

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI)

Operation and control of a hybrid power system

MEMÒRIA

19 de juny de 2019

Autor: Joan Francesc Quetglas Villalonga

Directors: Eduardo Prieto Araujo

Convocatòria: 02/2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



ETSEIB

Abstract

During the last years the urgency to invest in new types of energies has become clearer. These energies are the renewable energies, whose together with microgrids, allows the energetic independence of remote areas or developing countries from the world.

The project explained in here studies the design, modelling, control and simulation of a microgrid completely isolated. This microgrid is based on diesel generators (DG), photovoltaic energy (PV) and an AC/DC converter known as Voltage Source Converter (VSC).

The modelling of the working principle of PV cells is extensively studied and the Maximum Power Point Tracking (MPPT) control algorithm used in order to make PV work at maximum power.

Different scenarios of the Diesel Generator are presented and the most robust and reliable is chosen to feed the microgrid with constant power supply.

A complete study of the VSC model is explained and implemented together with the PV and the Energy Storage System (ESS) with the goal of feeding the three-phase grid with this DC sources.

And finally the control for the various elements of the grid, most of them based on PI controllers in order to reduce the steady-state error to zero, and ensure that the different simulations changing the input parameters of the system, allows the system to reach a balance state in a small time.

Índex

1	Glosari de termes	7
2	Prefaci	9
2.1	Origen del projecte	9
2.2	Requeriments previs	9
3	Introducció	11
3.1	Objectius del projecte	11
3.2	Abast del projecte	11
4	Fonaments dels sistemes de generació elèctrica utilitzats	13
4.1	Generadors dièsel	13
4.1.1	Funcionament d'un generador dièsel	14
4.1.1.1	Principi de combustió del dièsel	14
4.1.1.2	Estructura del generador dièsel	15
4.1.1.3	Tipus de generador elèctric	16
4.1.1.3.1	Màquina síncrona	16
4.1.1.3.2	Màquina asíncrona	17
4.2	Energia solar fotovoltaica	18
4.2.1	Estructura de les cèl·lules fotovoltaïques	20
4.3	Convertidors i sistema d'emmagatzematge	20
4.3.1	Modes de funcionament dels convertidors	20
4.3.2	Modes d'implementació	21
4.3.3	Sistema d'emmagatzematge	22
5	Descripció del sistema	25
5.1	Microxarxa	25
5.1.1	Adaptació del sistema de bateries	26
5.1.2	Adaptació de les plaques solars	26
6	Modelització del sistema	29
6.1	Modelització del generador dièsel	29
6.2	Modelització de les plaques solars	31
6.2.1	Maximum Power Point Tracking Algorithm	38
6.3	Modelització del VSC	38
6.4	Modelització de la càrrega, bateries i línies de transport	40
7	Control del sistema	41
7.1	Control del generador dièsel	41
7.2	Control de les plaques solars	42
7.2.1	Control costat PV	42
7.2.2	Control costat xarxa	45
7.2.2.1	Current Loop Controller	46
7.2.2.2	Voltage Controller	48
7.2.2.3	Phase Locked Loop	48
7.3	Control sistema d'emmagatzematge	49
7.3.1	Control costat xarxa	49

8	Simulacions i resultats	53
8.1	Paràmetres	53
8.1.1	Paràmetres generador dièsel	54
8.1.2	Paràmetres energia fotovoltaica	54
8.1.3	Paràmetres <i>Energy Storage System</i>	56
8.2	Simulacions	57
8.2.1	Estudi funcionament normal de la microxarxa	58
8.2.2	Estudi funcionament microxarxa amb demanda variable	63
8.2.3	Estudi funcionament microxarxa amb desconexió	69
9	Conclusions	73
9.1	Pròxims passos	73
10	Pressupost	75
10.1	Cost de personal	75
10.2	Cost de llicències	75
10.3	Cost de material	75
10.4	Cost total associat	76
11	Impacte ambiental	77
A	Annexos	81
A.1	Transformada de Park	81
A.2	Simulacions excitadors generador dièsel	81
A.3	Model Matlab plaques solars	84
	Bibliografia	87

Índex de figures

4.1	Procés de refinament del petroli. [4]	14
4.2	Cicle de combustió dièsel	15
4.3	Esquema simplificat de les parts principals dels generadors dièsel. [7]	16
4.4	Estructura màquina sincrona i sortida corrent	17
4.5	Regions de funcionament segons la rotació	17
4.6	Potència mundial acumulada [GW]. [10]	18
4.7	Evolució del preu del panell solar. [9]	19
4.8	Generació elèctrica a Espanya al 2017. [11]	19
4.9	Radiació solar anual a tot europa durant el 2005. [12]	19
4.10	Representació simplificada d'una cèl·lula de Silici i el seu funcionament. [13]	20
4.11	<i>Off-grid system</i> . En aquest projecte no es fa ús de l'inversor. [14]	21
4.12	<i>Grid-connected system</i> . [14]	21
4.13	1. Central, 2. String, 3. Module	21
4.14	Irradiació diària vs Demanda diària. [15]	22
5.1	Esquema simple de la microxarxa a estudiar	25
5.2	Components d'una microgrid. [17]	26
5.3	Convertidor VSC amb la part DC modelada com una font de voltatge. [5]	26
5.4	Convertidor VSC amb la part DC modelada com una font de corrent i un condensador. [5]	27

6.1	Blocs funcionals i les seves interconnexions. [18]	29
6.2	Model Simulink del generador amb CAES. [18]	29
6.3	Esquema de blocs del generador dièsel	30
6.4	Generador dièsel basat en un excitador AC1A	30
6.5	Excitador AC1A	31
6.6	Excitador DC2A	31
6.7	Diagrama simplificat de la cèl·lula fotovoltaica. [19]	32
6.8	Comparativa períodes de garantia de producte i rendiment.[21] i [22]	33
6.9	Comparativa eficiència energètica. [21] i [22]	33
6.10	Especificacions de la placa SPR-X22-360. [23]	34
6.11	Paràmetres Matlab SunPower X22-360	34
6.12	Corbes funcionament a diferents irradiacions	35
6.13	Corbes funcionament a diferents temperatures	35
6.14	L'esquema es pot simplificar més eliminant la R_s . [24]	36
6.15	Corbes P-V obtingudes amb la configuració especificada	37
6.16	Corbes I-V obtingudes amb la configuració especificada	37
6.17	Esquema general per la simulació a partir de les equacions esmentades anteriorment	38
6.18	Model del VSC. [5]	39
6.19	Model equivalent de la part alterna del VSC. [5]	40
6.20	Equivalent de la càrrega	40
7.1	Model equivalent del control d'un <i>diesel generator</i> (DG).	41
7.2	Generador dièsel complet amb el seu control	42
7.3	Algoritme de funcionament MPPT. [25]	43
7.4	Esquema convertidor DC/DC boost.	44
7.5	Esquema de les plaques solars ampliat amb l'algoritme i el convertidor.	44
7.6	MPPT treballant conjuntament amb el DC/DC boost converter.	44
7.7	Potència injectada a la xarxa contínua	45
7.8	Corrent a la xarxa contínua	45
7.9	Esquema de control del VSC adaptat a energia fotovoltaica. [5]	46
7.10	Esquema Current Loop Controller	46
7.11	Esquema Voltage Controller. [5]	48
7.12	Phase Locked Loop. [5]	48
7.13	Plaques solars + VSC + MPPT	49
7.14	Esquema del control del VSC per sistemes d'emmagatzematge. [5]	50
7.15	Bateries + VSC	51
8.1	Esquema general de la microxarxa dissenyada.	53
8.2	Estabilitat del generador per diferents valors de K.	54
8.3	Evolució irradiància durant la simulació. [28]	55
8.4	Evolució temperatura durant la simulació. [28]	55
8.5	Potència reactiva desitjada injectada per les plaques fotovoltaïques.	56
8.6	Potència activa desitjada injectada i consumida per les bateries.	57
8.7	Potència reactiva desitjada injectada i consumida per les bateries.	57
8.8	Valors de referència i reals de la i_d generada per les plaques fotovoltaïques.	58
8.9	Valors de referència i reals de la I_q generada per les plaques fotovoltaïques.	59
8.10	Potència generada per les plaques solars segons la irradiació i la temperatura.	59
8.11	Valors de referència i reals de la i_d consumida (intensitats positives) i generada (intensitats negatives per les bateries)	60

8.12	Valors de referència i reals de la i_q consumida (intensitats positives) i generada (intensitats negatives) per les bateries.	61
8.13	Variació del funcionament dels generadors dièsel segons la potència demandada per el sistema.	61
8.14	Evolució de la potència activa durant la simulació de la microxarxa.	62
8.15	Evolució voltatge xarxa durant la simulació	63
8.16	Perfil de demanda de la microxarxa	64
8.17	Valors de referència i reals de la i_d generada per les plaques fotovoltaïques. . . .	65
8.18	Valors de referència i reals de la i_q generada per les plaques fotovoltaïques. . . .	66
8.19	Valors de referència i reals de la i_q i i_d generada i consumida per les bateries. . . .	67
8.20	Variació del funcionament dels generadors dièsel segons les demandes de la xarxa. .	68
8.21	Balanç potència generada i consumida en la Simulació 2.	68
8.22	Voltatge de la xarxa per la simulació amb demanda variable.	69
8.23	Funcionament generador dièsel sota variació de demanda i parada de generador. . .	70
8.24	Balanç de potències	70
8.25	Voltatge de la xarxa per la simulació amb desconexió de generador.	71
9.1	Esquema del llaç extern a implementar. [26]	74
11.1	Estudi només amb generadors dièsel	77
11.2	Estudi dièsel+renovables+bateries	77
A.1	Representació geomètrica de la transformada de park. [5]	81
A.2	AC1A	82
A.3	AC4A	82
A.4	AC5A	82
A.5	DC1A	83
A.6	DC2A	83
A.7	ST1A	83
A.8	ST2A	83
A.9	Generació corrent fotovoltaic. Equació 6	84
A.10	Generació corrent diòde. Equació 9	84
A.11	Corrent diòde a temperatura de 25°C. Equació 10	84
A.12	Voltatge a 25°C pel càlcul de $V_{oc(T_1)}$. Equació 9	85

Índex de taules

7.1	Mètode The Hill Climbing	43
10.1	Cost humà	75
10.2	Cost llicències	75
10.3	Cost equimanet	76
10.4	Cost total projecte	76
11.1	Comparativa ús dièsel	78

1 Glosari de termes

AC	Alternating Current
DC	Direct Current
DG	Diesel Generator
DGS	Diesel Generator Set
DNI	Direct Normal Irradiation
DHI	Diffuse Horizontal Irradiation
ESS	Energy Storage System
GHI	Global Horizontal Irradiation
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportional-Integral
PLL	Phase Locked Loop
PV	Solar Photovoltaic
VSC	Voltage Source Converter

2 Prefaci

2.1 Origen del projecte

Aquest projecte sorgeix de l'interés de l'estudiant cap a les energies renovables, especialment de l'interés per els projectes de cooperació en zones en via de desenvolupament aplicant sempre les energies renovables com a primera opció.

Durant els darrers anys son diferents els projectes que han sorgit arreu del món amb l'objectiu d'habilitar, aquelles zones menys desenvolupades, de xarxes de generació elèctrica com el projecte RENGÀ [1] o la microxarxa de la illa de Sant Eustatius [2]. Tot i aquests exemples notables, són molts els passos que queden per fer i el nombre de illes arreu del món a electrificar [3].

A més, cada vegada s'implemente més microxarxes que afavoreixen a l'implementació de energies renovables (sent aquestes fonts les principals d'aquests tipus de xarxes). És aquest últim tema, el de les microxarxes, el que era totalment desconegut per l'autor del projecte i el que el va decantar a l'elecció d'aquest. El projecte ha ajudat a l'autor a ampliar el coneixement en energies renovables, convertidors i xarxes elèctriques.

2.2 Requeriments previs

Amb la necessitat d'entrar al món de les xarxes elèctriques i la implementació d'energies renovables, nocions d'enginyeria elèctrica per el càlcul i simulació de balanços de potència, electrònica bàsica per entendre els components del convertidors i el disseny de controladors han sigut necessaris.

3 Introducció

Un dels reptes més importants que el nostre planeta afronta aquests darrers anys és el canvi climàtic. Un canvi climàtic que es deu bàsicament a l'ús excessiu que s'ha fet dels combustibles fòssils durant centenars d'anys. Aquest problema s'està intentant mitigar amb la implementació de les energies renovables en una carrera tecnològica que cada any s'accelera més. Aquestes energies a part d'emetre quantitats molt inferiors de CO₂ de les emeses per els combustibles fòssils, es presenten com una energia que mai s'acaba. Tot i aquests beneficis tant clars que presenten, moltes de les tecnologies per explotar recursos com el sol, el vent o l'energia del mar, encara necessiten un perfeccionament important per augmentar la seva eficiència i desbancar els combustibles fòssils. És important remarcar que es requereix de connexions adequades entre els generadors renovables i la xarxa elèctrica.

Per tant, el projecte que aquí es presenta, té com objectiu modelar i simular un sistema de generació i distribució elèctrica a petita escala, basat en energies renovables, dièsel i sistemes d'emmagatzematge d'energia.

3.1 Objectius del projecte

El principal objectiu d'aquest projecte és la modelització d'una microxarxa amb la seva posterior simulació per verificar que el comportament i la modelització són correctes. Es tracte de modelar i simular una microxarxa totalment aïllada de les grans xarxes elèctriques. A més es farà ús del convertidor VSC, el que comporta el seu estudi, modelització i control, del que s'en podran treure diversos subobjectius:

- Anàlisis, modelització i estudi del control del Voltage Source Control (VSC). A més s'estudiarà la implementació amb les plaques fotovoltàiques i el sistema d'emmagatzematge com s'explicarà en els següents capítols.
- Disseny, modelització i estudi de control del generador dièsel (DG) que servirà de generador principal juntament a l'energia fotovoltàica.
- Disseny, modelització i control dels elements secundaris com càrregues (fixes o variables), el sistema d'emmagatzematge d'energia (ESS) i les xarxes de transport de l'energia.

3.2 Abast del projecte

L'abast inclou el disseny i el control del VSC, el disseny, la modelització i el control del DG mitjançant el Diesel Engine Governor i el disseny, elecció i control de les plaques solars. A més tots els elements secundaris es dissenyem de manera més simple possible donat que no s'inclouen en els objectius principals del projecte. Tots els resultats s'han realitzat mitjançant l'eina Matlab Simulink.

Finalment, es farà una simplificació ideal del VSC i que serà diferent per l'energia fotovoltàica i es bateries. Amb l'intenció de simplificar els càlculs es seguiran les directrius del capítol: *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems*. [5]

4 Fonaments dels sistemes de generació elèctrica utilitzats

En aquest capítol l'autor explica el funcionament bàsic dels dos sistemes de generació que s'utilitzaran en aquest projecte, i la seva situació actual en termes de producció. A més degut a que un dels sistemes de generació requereix l'ús de convertors de corrent continu a altern, es dedicaran uns apartats a l'explicació del funcionament bàsic d'aquest.

4.1 Generadors dièsel

Avui en dia es poden diferenciar dos tipus d'usos per la generació dièsel. En molts països s'usen aquest tipus de generadors, com a generadors d'emergència en cas que es produeixin caigudes de xarxa que impliquin afectacions importants. En molts casos, és possible trobar aquests tipus de generadors en infraestructures sensibles com hospitals, aeroports, etc. L'altre ús i en el qual ens centrarem, és en països o zones on s'usen com generadors principals, ja sigui com a generadors únics o juntament amb altres tipus d'energia, moltes vegades renovables. Aquest tipus de generació també té un paper molt important en el món marítim, on moltes vegades s'usen com a font de generació elèctrica en grans vaixells.

El generador dièsel competeix principalment amb el generador de gas natural [6] el qual és molt més barat. A continuació s'adjunten els avantatges de l'ús dels *Diesel Generators (DG)* enfront d'altres generadors de combustibles fòssils:

- Tot i el seu elevat preu, el dièsel compta amb major densitat energètica, el que el fa molt més eficient que el seu competidor directe, el gas natural.
- Un dels avantatges principals, i el motiu de que s'usi com a generador d'emergència en instal·lacions sensibles com hospitals és que es comporta com una font d'alimentació constant de manera ininterrompuda.
- A diferència dels generadors alimentats amb gasolina, el dièsel és molt més rentable per diversos motius:
 - Motors més resistents i fiables.
 - No requereixen bugies o cables, reduint notablament els costos de manteniment.
 - La vida útil dels generadors dièsel és molt més elevada que la resta de generadors actualment en funcionament.

Finalment s'espera que la demanda de generadors dièsel, tot i el creixement de les energies renovables, augmenti degut a la falta de infraestructures de xarxes elèctriques fiables sobretot en les zones de Orient Mitjà, Àfrica i el pacífic asiàtic. La ràpida industrialització és un dels factors que ajuden a que aquesta demanda sigui cada vegada més elevada, degut a la necessitat de generadors d'energia potents en activitats com la mineria, infraestructures ferroviàries, etc.

Un exemple molt clar és Canadà, un país que compta amb un gran nombre de comunitats remotes [3], les quals principalment estan alimentades per generadors dièsel. Aquests darrers anys i donat que compten amb unes òptimes condicions de règims de vent, la tendència és de

la creació de xarxes alimentades per vent i dièsel en un intent de sostenibilitzar el país.

4.1.1 Funcionament d'un generador dièsel

El *Diesel Generator Set (DGS)* és una màquina compacta i robusta on l'energia mecànica es converteix en energia elèctrica. A continuació s'exposen en detall els principis bàsics de funcionament.

4.1.1.1 Principi de combustió del dièsel

El dièsel, combustible tan utilitzat avui en dia [4] i també conegut com gasoil, és un hidrocarbur que s'aconsegueix mitjançant la destil·lació del petroli. El mètode per la seva obtenció és el cracking, que consisteix en la introducció de petroli cru en una torre el qual s'escalfa fins que s'evaporen els gasos a una certa temperatura. Els vapors es condensen i es tornen a escalfar fins a tres vegades, fins que la condensació que s'obté és el dièsel. Amb cada procés d'escal·faments'obtenen hidrocarburs més lleugers els quals tenen propietats i utilitats molt diverses. Després de tot aquest procés el dièsel està formada per un 75% de hidrocarburs saturats i sobre un 25% de hidrocarburs aromàtics.

El cicle de refinament del petroli es pot trobar explicat gràficament a la Figura 4.1

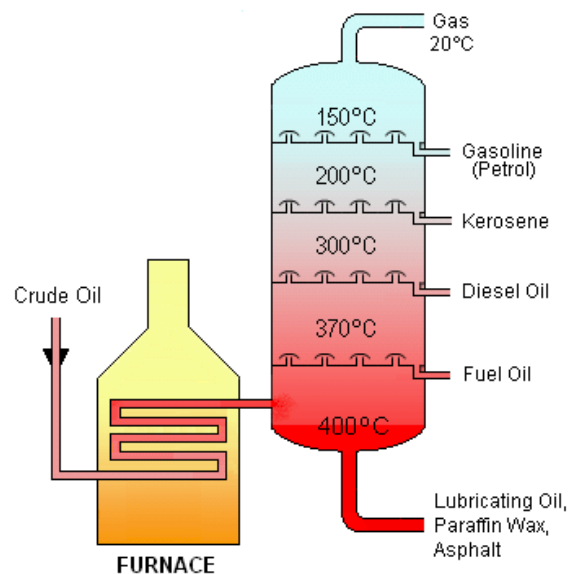


Figura 4.1: Procés de refinament del petroli. [4]

El principi de funcionament del dièsel es basa en la ignició del combustible al ser injectat a alta pressió i polvoritzat dins la càmera de combustió que conté aire a una temperatura superior a la d'autocombustió, el que li permet encendre's sense necessitat d'ignició, procés conegut com autoinflamació. L'elevada temperatura a la que es troba la cambra de combustió prové del segon temps del motor, la coneguda compressió. El combustible s'injecta a gran pressió des de uns orificis molt petits que té l'injector, el que permet que s'atomitzi i es mescli amb l'aire (que es

troba entre 700° i 900°C) i a alta pressió. Com a resultat obtenim que inflami molt ràpidament. La forta combustió provoca que el gas s'expandeixi dins la càmera impulsant el pistó cap a fora.

Al ser una expansió adiabàtica es genera un moviment rectilini a través de la carrera del pistó el qual mitjançant la biela transmet el moviment al cigonyal, transformant el moviment rectilini alternatiu en moviment de rotació que serà usat per la generació elèctrica.

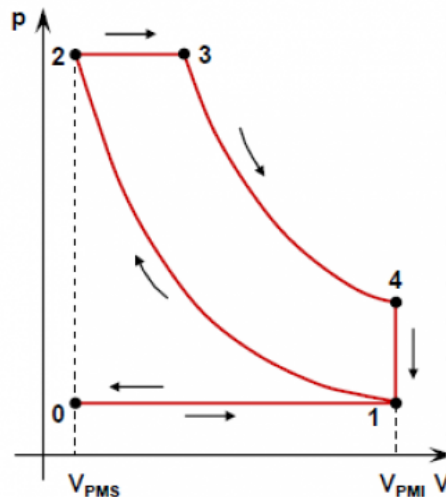


Figura 4.2: Cicle de combustió dièsel

Etapes:

- 1-2: Compensió adiabàtica
- 2-3: Combustió a pressió constant
- 3-4: Expansió adiabàtica
- 4-5: Refredament a volum constant (escapament)

4.1.1.2 Estructura del generador dièsel

Tot i que es conegui aquest generador com a generador dièsel a la realitat no s'encarrega de generar energia elèctrica, si no que transforma l'energia mecànica generada per el motor dièsel en energia elèctrica mitjançant un transformador. Aquest fet permet separar el DG en dues parts importants: la part elèctrica i la part mecànica.

Pel que fa a la part mecànica cal destacar certs elements:

- Motor dièsel (1)
- Sistema de combustible, permet l'alimentació del generador (3)
- Sistema de lubricació (6)

- Sistema de refredament i escapament (5)

Entre les dues parts en la que hem dividit el generador, es troba l'assemblatge que permet al trasmissió de la rotació obtinguda a la part mecànica a la part que generarà l'energia elèctrica.

- Alternador, l'encarregat de transformar l'energia mecànica en energia elèctrica i del qual es farà un estudi més profund. (2)
- Regulador de voltatge. (4)
- Sistema d'emmagatzematge. (7)
- Panell de control, el qual permet la regulació de tot el sistema de generació tant per entregar una potència concreta o com per satisfer les necessitats de la xarxa a la qual estigui connectat.(8)

La representació d'un generador dièsel convencional es pot trobar a la Figura 4.3.

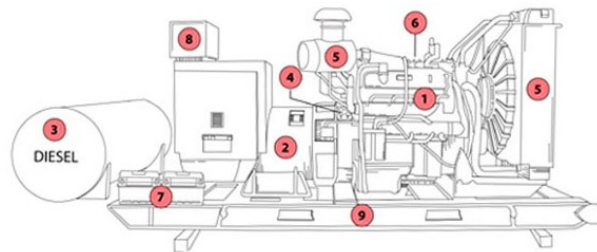


Figura 4.3: Esquema simplificat de les parts principals dels generadors dièlsels. [7]

4.1.1.3 Tipus de generador elèctric

En el mercat es poden trobar molts tipus de generadors dièsel. Des de petits generadors per alimentar màquines a grans generadors per xarxes elèctriques. Aquest últim són en els que es centra aquest projecte.

Al ser generadors per grans xarxes elèctriques, els alternadors/generadors elèctrics són parts més complexes que abasteixen les xarxes trifàsiques. A aquest nivell es distingeixen dos generadors, el generador síncron i el generador d'inducció també coneguts com màquina asíncrona les quals poden treballar com a generadors o com a motors.

4.1.1.3.1 Màquina síncrona

Consisteix d'un rotor que és bàsicament un electroimant (Figura 4.4) i un estator que consisteix de tres bobines de cable que interseccionen amb el camp magnètic del rotor, repartits a 120°. Cada bobina abasteix d'energia una de les fases de la xarxa elèctrica. Amb la rotació del rotor es genera un corrent induït en cada una de les bobines que augmenta i que canvia de direcció amb cada passada del pol nord i el pol sud del rotor. Com el nom de la màquina indica la freqüència elèctrica està sincronitzada amb la rotació de l'eix i són mútuament dependents.

La relació entre la velocitat de rotació (rpm) i la freqüència ve donada per:

$$n = 60 \times \frac{f}{p} \quad (1)$$

- n: revolucions per minut de la màquina (rpm)
- f: freqüència en els borns de la màquina (Hz)
- p: nombre parell de pols

Aquest tipus de màquines es solen utilitzar més com a generadors que com a motors de corrent alterna ja que no presenten parell d'arrencada i serveixen per controlar la potència reactiva de la xarxa, gràcies a la seva capacitat de variar la potència reactiva que absorbeix o cedeix aquesta.

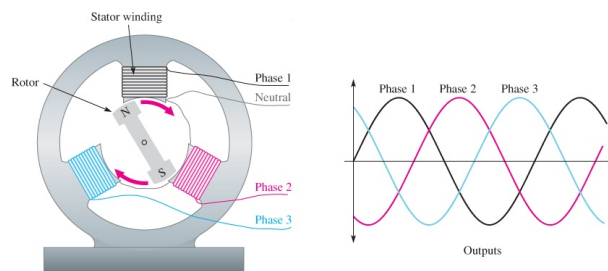


Figura 4.4: Estructura màquina síncrona i sortida corrent

4.1.1.3.2 Màquina asíncrona

El rotor de la màquina asíncrona, com bé indica el seu nom, no corre en sincronisme amb la freqüència de la màquina. Aquesta màquina pot treballar com a generador o motor depenent de la rotació. Quan el rotor gira més lentament que la velocitat de sincronisme actua com a motor i si gira més ràpid actua com a generador com es pot veure en la Figura 4.5.

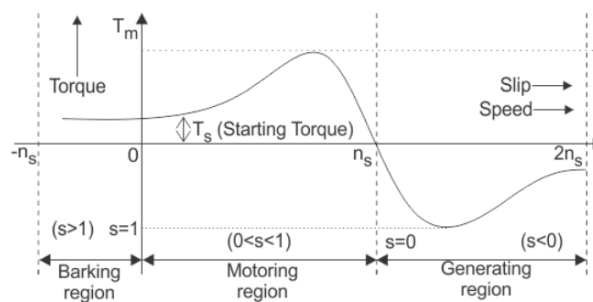


Figura 4.5: Regions de funcionament segons la rotació

Aquests generadors es solen utilitzar quan el control del motor principal no és possible, normalment turbines eòliques.

Per el projecte en qüestió s'ha decidit utilitzar la màquina síncrona com a generador elèctric del motor dièsel per els següents motius [8]:

- El motor dièsel aporta una potència de sortida constant, el que permet a la màquina síncrona treballar en règim òptim durant tota l'etapa de funcionament.
- Les màquines asíncrones requereixen la magnetització de l'estator abans d'iniciar la seva rotació o l'ús d'elements com condensadors per arrencar de zero.
- Com s'ha observat a la gràfica de la màquina asíncrona, aquesta ha de passar per un règim de funcionament com a motor abans de actuar com a generador.
- Les màquines síncrones al treballar com a generadors, permeten abastir a corrent i freqüència constant i entregar potència activa i reactiva a diferència de la asíncrona.

4.2 Energia solar fotovoltaica

L'apartat present intenta informar al lector sobre la situació actual de la producció d'energia solar i explicar els conceptes bàsics del seu funcionament.

L'energia fotovoltaica actualment es troba en el moment de màxim creixement a nivell mundial, potenciat en gran part per el desenvolupament d'aquesta tecnologia en països com Àsia, la Xina, Índia o Japó segons l'Anuari Fotovoltaic [9]. Aquest darrer any, s'ha superat la barrera dels 400 GW acumulats, superant els acumulats per l'energia nuclear, 393 GW.

Cal destacar que fins un 70% de la potència instal·lada es troba només a la Xina, Estats Units, Japó i Alemanya, on la Xina supera els 131 GW enfront els 51 GW dels Estats Units. Tot i això, la tendència mundial de la incorporació d'aquesta tecnologia als mercats energètics és imparable, augmentant un 50% el 2016 i un 38,7% el 2017. S'espera que la tendència disminueixi propiciada en gran part per la consolidació de la tecnologia en el mercat energètic.

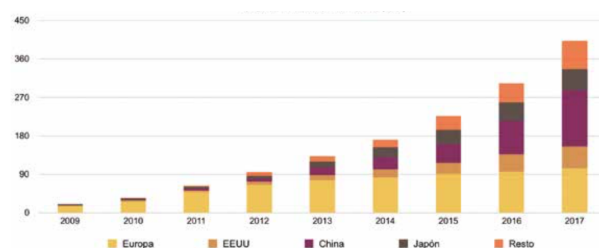


Figura 4.6: Potència mundial acumulada [GW]. [10]

Tot i aquesta tendència de pujada, molts experts reclamen marcs regulatoris estables i que afavoreixin el desenvolupament de la fotovoltaica per evitar casos com el d'Espanya, on s'ha demostrat la gravetat amb la que poden afectar els canvis regulatoris d'un país en el desenvolupament d'aquesta tecnologia, on tot i tenir els índexs més grans de radiació solar de tot Europa, només es van generar 5,5 GW al 2016.

Aquests darrers anys, les polítiques econòmiques de recolzament a l'energia fotovoltaica han

passat de retribucions en forma de tarifes a altres mecanismes com les subhastes. Donat aquest cas, i gràcies a l'aprenentatge assolit en la tecnologia i la continua reducció de costos (com es pot veure a la Figura 4.8), l'energia renovable s'ha convertit en una forta competidora amb la resta de energies. Valen com exemples com el d' Abu Dhabi i Dubai, on el 2017 van tancar subhastes amb PPAs (Power Purchase Agreements) per sota de 0.03 \$/kWh. En canvi a Espanya es van adjudicar 3,9 GW a un cost d'inversió inferior a 700€/kW.

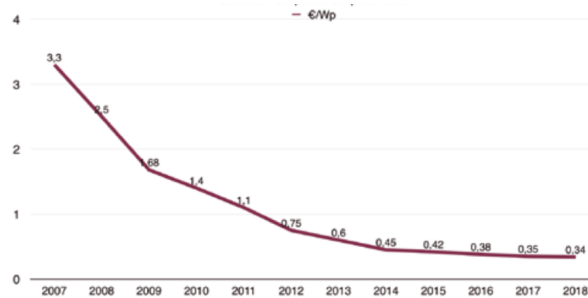


Figura 4.7: Evolució del preu del panell solar. [9]

A Espanya de l'energia total del mercat elèctric durant el 2017, només un 3,2% provenia de l'energia solar, molt per sota de les capacitats reals de producció d'aquesta energia, com demostren els nivells d'irradiació en la Figura 4.9.

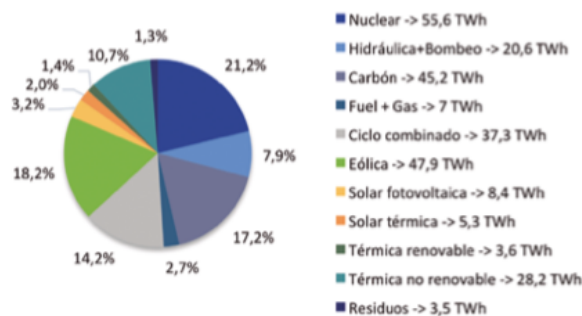


Figura 4.8: Generació elèctrica a Espanya al 2017. [11]

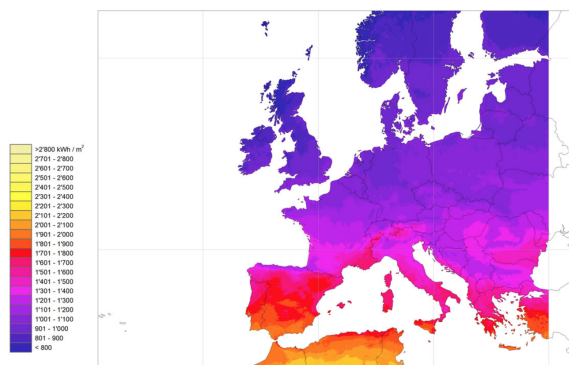


Figura 4.9: Radiació solar anual a tot europa durant el 2005. [12]

4.2.1 Estructura de les cèl·lules fotovoltaiques

Una cel·la solar és un dispositiu electrònic que directament converteix la llum solar en electricitat. La llum que brilla dins la cèl·lula genera tant corrent com voltatge, necessaris per generar el corrent elèctric. Aquesta mecanisme es coneix com efecte fotovoltaic.

Aquest procés requereix d'un material en el qual l'absorció de la llum elevi l'estat energètic d'un electró i, en segon lloc, que sigui capaç de transportar aquest electró d'alta energia de la cèl·lula solar a un circuit extern. Una vegada surt de la cèl·lula, l'electró dissipa la seva energia i torna a la cèl·lula solar.

Hi ha una gran varietat de materials i processos que satisfan aquesta conversió d'energia, però a la pràctica gairebé tots els materials utilitzats són materials semiconductors, mitjançant la junció p-n la qual separa els electrons (a la zona tipus n) i els forats (a la zona tipus p) per prevenir la seva recombinació.

La representació del funcionament de les cèl·lules fotovoltaiques es pot trobar a la Figura 4.10

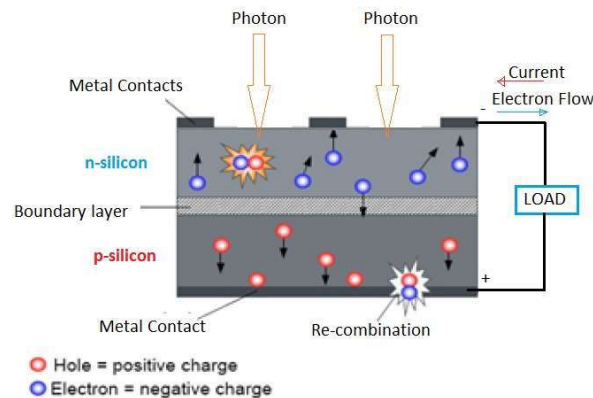


Figura 4.10: Representació simplificada d'una cèl·lula de Silici i el seu funcionament. [13]

4.3 Convertidors i sistema d'emmagatzematge

Com s'ha comentat breument en els apartats anteriors, donada la necessitat de alimentar una xarxa trifàsica, serà necessària la implementació de convertidors que bàsicament s'encarregaran de convertir l'energia DC a energia AC compatible amb la xarxa, la demanda i altres generadors que formen la xarxa. Els convertidors a part d'elegir-se segons l'aplicació o el material que formen els seus semiconductors, com es pot veure en el capítol 5, també s'elegeixen segons el seu mode d'operació.

4.3.1 Modes de funcionament dels convertidors

- Off-grid systems. Com el seu nom indica la xarxa es troba totalment aïllada [14]. Per aquest motiu i per evitar excessos d'energia s'afegeixen mòduls de ESS que permeten a

la xarxa seguir operant i abastir de corrent durant la nit, quan no hi ha generació de PV. (Figura 4.11)

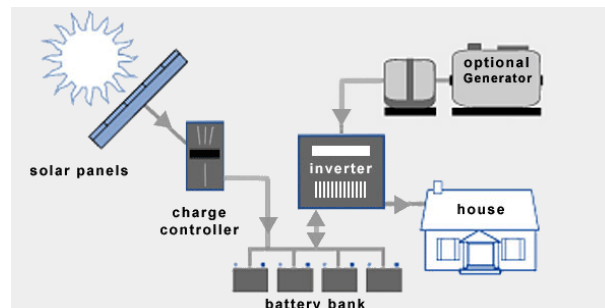


Figura 4.11: *Off-grid system*. En aquest projecte no es fa ús de l'inversor. [14]

- Grid-connected systems. La demanda de la xarxa pot ser abastida tant per part de la xarxa com per part dels generadors d'energia auxiliars [14]. En aquest mode d'operació el convertidor s'encarrega de subministrar corrent a la xarxa AC mentre que el voltatge ve subministrat per la pròpia xarxa. (Figura 4.12)

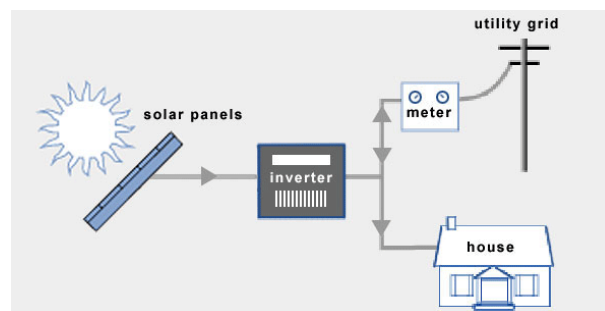


Figura 4.12: *Grid-connected system*. [14]

4.3.2 Modes d'implementació

Segons la connexió amb les plaques solars podem distingir tres tipus de convertidors:

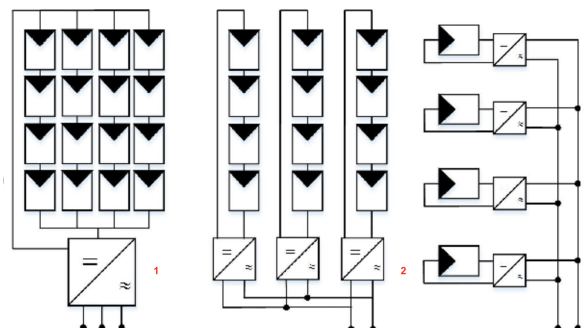


Figura 4.13: 1. Central, 2. String, 3. Module

- Central. Un sol convertidor s'encarrega de la transformació de l'energia de tots els mòduls

de PV.

- String. Compta amb diversos convertidors que s'encarreguen de la conversió de l'energia de mòduls connectats en sèrie. Permet que cada branca treballi al seu *Maximum Power Point* (MPP).
- Module. Cada mòdul té el seu propi convertidor. És un sistema més car però que permet que cada mòdul treballi al seu MPP.

4.3.3 Sistema d'emmagatzematge

A la Figura 4.14 es pot veure el perfil de irradiació normal en un dia i la fluctuació de la demanda durant el mateix.

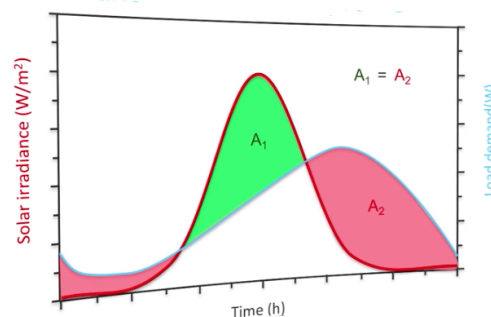


Figura 4.14: Irradiació diària vs Demanda diària. [15]

Gràcies a la introducció de les bateries els pics de producció d'energia solar màxima (A_1) poden emmagatzemar-se per ser utilitzats quan la demanda és més elevada (A_2). Actualment l'opció més utilitzada per PV són les bateries, més concretament les bateries secundàries que permeten la càrrega i la descàrrega durant llargs períodes de temps.

Hi ha una sèrie de paràmetres a tenir en compte a l'hora d'implementar les bateries amb PV. Cada bateria té un voltatge nominal que és al voltatge al que teòricament ha d'operar (normalment 12V, 24V i 48V) tot i que pot ser diferent depenent de les interconnexions que es facin entre elles. Per aquest projecte es farà utilitat de bateries de major voltatge, al voltant de 400 V. L'altra característica principal de la bateria és la capacitat nominal que és la quantitat de càrrega (Ah o mAh) que es pot entregar a un determinat voltatge.

És important no confondre la capacitat de la bateria amb la capacitat d'energia, que és la quantitat d'energia que pot emmagatzemar:

$$E_{\text{battery}} = C_{\text{battery}} \times V \quad (2)$$

Finalment, l'eficiència d'emmagatzematge és molt important. Bàsicament és la diferència entre el total d'energia total capaç d'emmagatzemar i la energia total capaç de entregar. Aquesta eficiència es pot disgregar en l'eficiència de voltatge i l'eficiència de Coulomb, que plasma la

relació entre la càrrega total i la descàrrega total en un cicle total de càrrega.

$$\eta_V = \frac{V_{\text{disch}}}{V_{\text{charge}}} \times 100; \eta_C = \frac{Q_{\text{disch}}}{Q_{\text{charge}}} \times 100 \quad (3)$$

Obtenint així la eficiència total de la bateria.

$$\eta_{\text{batt}} = \eta_V \times \eta_C \quad (4)$$

5 Descripció del sistema

En aquest episodi es presentaran els diferents elements que componen la microxarxa a estudiar. Els elements de la microxarxa a estudiar són els següents: el sistema de generació renovable de PV, el grup de generadors dièsel, el sistema d'emmagatzematge d'energia (ESS) i la demanda que es modelitzarà com una càrrega. L'esquema de la Figura 5.2 representa la microxarxa a estudiar.

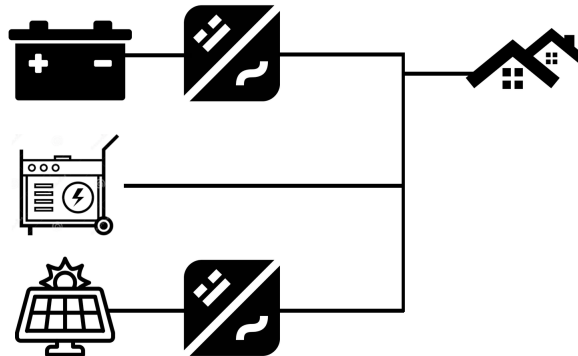


Figura 5.1: Esquema simple de la microxarxa a estudiar

El sistema de generació estarà format per les plaques fotovoltaiques, els generadors dièsel i el sistema d'emmagatzematge d'energia, les bateries. Tant les PV com el ESS operen en corrent i voltatge DC, per això, amb la intenció de connectar-los a la xarxa AC, serà necessari l'ús de convertidors. Pel que fa al tipus de semiconductors usats en el convertidor es basaran en els IGBT que permeten canvis ràpids i modular qualsevol voltatge desitjat.

Dels possibles convertidors que inclouen aquest tipus de semiconductors s'ha elegit el VSC que ens permet el control independent de la potència activa i reactiva. La correcta modulació dels IGBT ens permetrà generar el voltatge trifàsic desitjat en la part AC.

Finalment els cables utilitzats per connectar els diferents elements es consideraran com ideals, per tant no es tindran pèrdues degudes a l'efecte Joule.

5.1 Microxarxa

Com bé diu la seva definició, una microxarxa (més coneguda com a microgrid) és una versió reduïda de les grans xarxes elèctriques que generen i distribueixen energia als diferents països. Per tant com els seus homòlegs grans, disposen de generadors d'energia, distribuïdors d'energia i controls.

Els beneficis d'aquestes es poden resumir en [17]:

- Econòmics. Milloren la eficiència i els costos energètics prevists a llarg termini.
- Mediambientals. Gràcies a que la majoria inclouen un o més generadors d'energia sos-

tenible com solar, eòlica i geotèrmica, el que afavoreix a reduir la petjada de carboni i les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

- Personalitzables. Cada microgrid és diferent ja que s'adeqüen a les necessitats de la comunitat.
- Aïllables. Poden treballar aïllades de la xarxa general de manera continuada i constant.
- Eficiència. Al ser xarxes locals on els generadors d'energia estan a poca distància dels demandants d'energia les pèrdues per transport d'energia són mínimes el que augmenta l'eficiència del sistema.



Figura 5.2: Components d'una microgrid. [17]

Definit el tipus de convertidor a utilitzar i els diferents tipus de generadors i sistemes d'emmagatzematge que s'implementen, l'objectiu dels pròxims apartats és de clarificar el disseny d'aquests sistemes amb el VSC.

5.1.1 Adaptació del sistema de bateries

Per aquest cas, el ESS estarà connectat a la part DC del convertidor elegit, proporcionant una tensió constant al convertidor AC/DC.

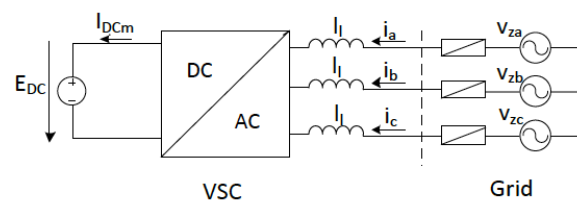


Figura 5.3: Convertidor VSC amb la part DC modelada com una font de voltatge. [5]

5.1.2 Adaptació de les plaques solars

A diferència del sistema de bateries, degut a la topologia de les plaques solars, s'introdueix un condensador de derivació que permetrà mantenir constant el voltatge i assegurar el balanç de

potències entre la part AC i la part DC com es pot veure en la Figura 5.4.

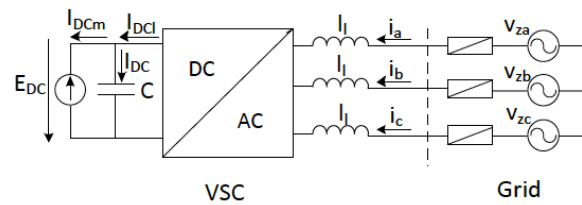


Figura 5.4: Convertidor VSC amb la part DC modelada com una font de corrent i un condensador. [5]

Per tant, a l'hora modelar el sistema, es pot entendre el sistema de generació solar con una font de corrent.

6 Modelització del sistema

Aquest capítol està dedicat a que el lector compregui els principis matemàtics i electrònics que hi ha al darrere cada generador utilitzat, sistema d' emmagatzematge, línia de transport, convertidor i càrrega. Per aquest propòsit, s'ha fet ús del software en versió acadèmica MATLAB Simulink. Una gran part d'aquest capítol anirà enfocat al disseny dels generadors.

6.1 Modelització del generador dièsel

Com s'ha presentat en l'apartat 7.1 el generador dièsel com molts altres sistemes de producció electromecànica es pot dividir en quatre grans components (Figura 6.1).

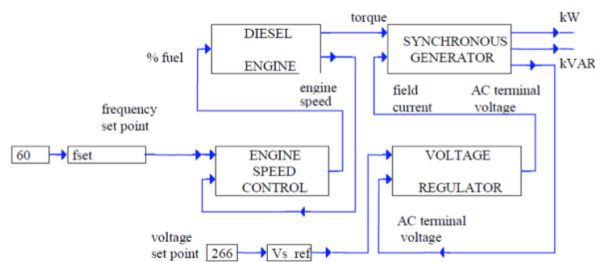


Figura 6.1: Blocs funcionals i les seves interconnexions. [18]

Després d' una revisió de diversos articles sobre generadors dièsel, quatre models han sigut seleccionats per elegir el més adient per el projecte aquí present.

Model 1

Model descrit per equacions físiques com es pot veure a la Figura 6.2. La part elèctrica s'obté a partir de lleis físiques, com les transformades de Park A.1, amb la intenció de modelar la màquina síncrona i la connexió a la xarxa. El rendiment de la combustió i el consum de dièsel es milloren amb la optimització del rati aire/fuel gràcies a l'ús de Compressed Air Energy Storages (CAES) com bé s'explica a l'article [3]. Es basa en la introducció d'aire comprimit a la vàlvula d'admissió del motor dièsel.

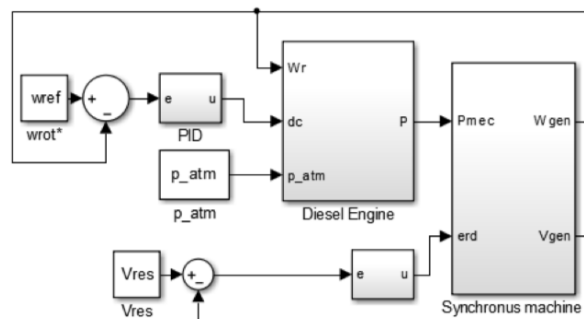


Figura 6.2: Model Simulink del generador amb CAES. [18]

Un dels beneficis d'aquest model és la introducció de la sobrealimentació. Tot i això és un model difícil de simular degut al gran nombre d'equacions.

Model 2

Aquest model presenta detalladament la part mecànica del generador, i està inspirat en un model de gasolina. Es basa en fenòmens purament mecànics, com el procés de combustió, controlant la velocitat de la màquina amb un accionador ràpid.

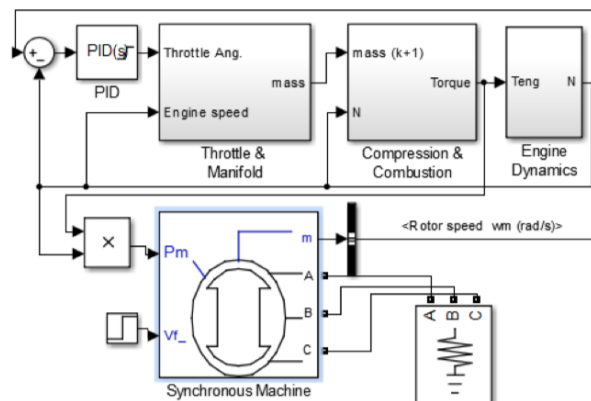


Figura 6.3: Esquema de blocs del generador dièsel

El problema d'aquest motor és que només respon correctament a intervals de potència petits el que el fa molt poc flexible i difícil d'adaptar a usos més generals.

Model 3

El procés de combustió intern està basat en actuadors amb models tradicionals per representar la pat mecànica del generador.

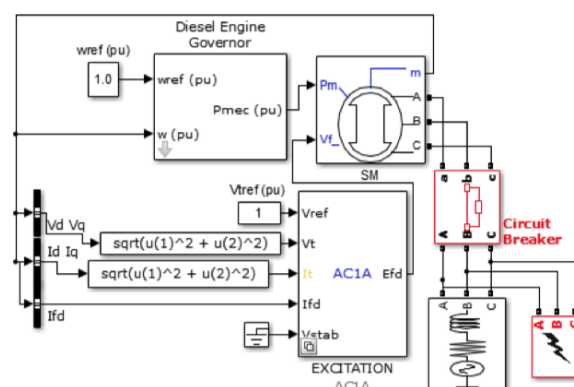


Figura 6.4: Generador dièsel basat en un excitador AC1A

Aquest model permet veure els fenòmens d'estabilitat elèctrica i el rendiment del generador.

Aquest últim model és l'elegit com a model a usar-se en la microxarxa. L'excitador AC1A s'ha

elegit ja que estabilitzi els valors de la màquina sícrons en menys de 2 s com es pot veure a la Figura 6.5

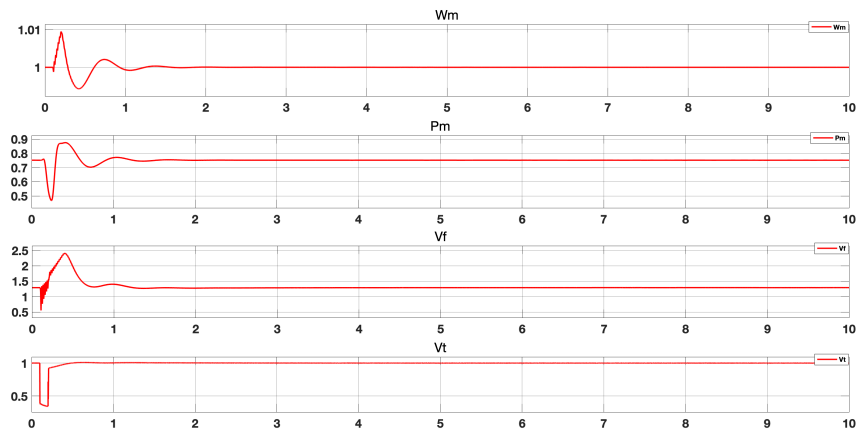


Figura 6.5: Excitador AC1A

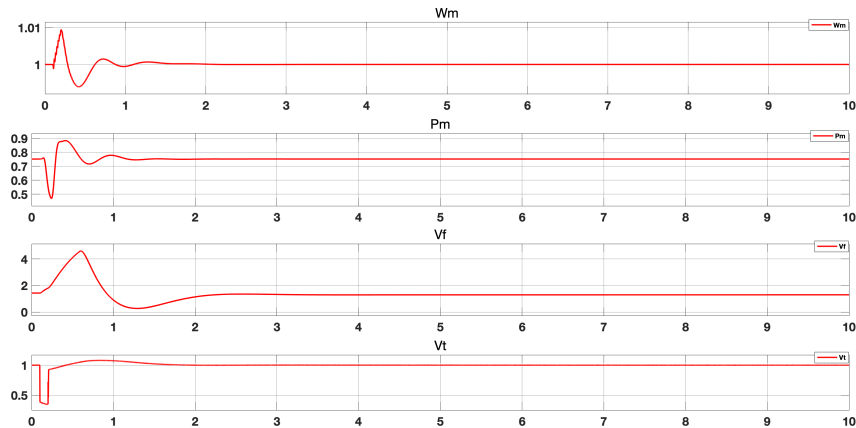


Figura 6.6: Excitador DC2A

La resta de simulacions realitzades amb tots els excitadors disponibles es poden trobar a l'annex A.2.

6.2 Modelització de les plaques solars

L'equivalent més simple d'una cèl·lula fotovoltaica és una font de corrent en paral·lel amb un díode. La sortida de la font de corrent és directament proporcional a la llum que incideix en la cel·la. El díode permet determinar les característiques I-V d'aquesta.

Per tal d'incrementar la precisió i la sofisticació del model es poden tenir en compte les següents característiques i paràmetres:

- Dependència de la temperatura amb la corrent de saturació del díode I_O .
- Dependència de la temperatura amb la corrent del fotó I_L .

- Resistències en sèrie R_S , que permetran més precisió entre el MPP i el voltatge del circuit obert.
- Resistència R_p en paral·lel amb el díode.
- Finalment, permetent que el factor de qualitat del díode n sigui variable enlloc de només 1 o 2.

Per facilitar la feina d'aquest projecte s'ha decidit modelar un sistema de complexitat moderada amb les següents concessions:

- S'ha inclòs la resistència R_S , però no la R_p .
- S'ha usat un díode simple amb el factor de qualitat fixat al que permet una millor corba.

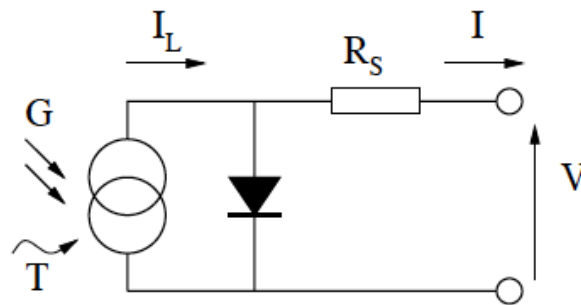


Figura 6.7: Diagrama simplificat de la cèl·lula fotovoltaica. [19]

El model presentat, basat en les equacions de Walker [19], és un model simplificat del model de dos díodes presentat per Gow and Manning [20]. El diagrama es pot observar en la Figura 6.7. Les equacions que descriuen les característiques I-V són

$$I = I_L - I_0(e^{q(V+IR_S)/nkT} - 1) \quad (5)$$

$$I_L = I_{L(T_1)}(1 + K_0(T - T_1)) \quad (6)$$

$$I_{L(T_1)} = G * I_{SC(T_1, \text{nom})}/G_{(\text{nom})} \quad (7)$$

$$K_0 = (I_{SC(T_2)} - I_{SC(T_1)})/(T_2 - T_1) \quad (8)$$

$$I_0 = I_{0(T_1)} * (T/T_1)^{3/n} * e^{-qV_g/nk*(1/T-1/T_1)} \quad (9)$$

$$I_{0(T_1)} = I_{SC(T_1)}/(e^{qV_{oc(T_1)}/nkT_1} - 1) \quad (10)$$

$$R_S = -dV/dI_{V_{oc}} - 1/X_V \quad (11)$$

$$X_V = I_{0(T_1)} * q/nkT_1 * e^{qV_{oc(T_1)}/nkT_1} \quad (12)$$

En aquestes equacions hi ha una sèrie de paràmetres que dependran del model de placa solar elegit, $I_{SC(T_1)}$, $I_{SC(T_2)}$, $V_{oc(T_1)}$, T_2 , T_1 i G_{nom} . Per l'elecció del mòdul més adient per aquest projecte s'han tingut en compte factors com

- Garantia del producte, que protegeix al consumidor contra defectes de manufacturació o material.
- Garantia de funcionament, també coneguda com a garantia de potència de sortida, assegura que la producció d'energia al cap de cert temps de vida serà la mínima especificada. L'estàndard sol ser del 80-83% de producció d'energia passats 25 anys d'ús.
- Eficiència energètica, interessa que els mòduls tinguin el menor percentatge possible de pèrdues energètiques durant la generació.

En les Figures 6.8 i 6.9 es poden veure les millors plaques basant-se en els factors esmentats anteriorment.

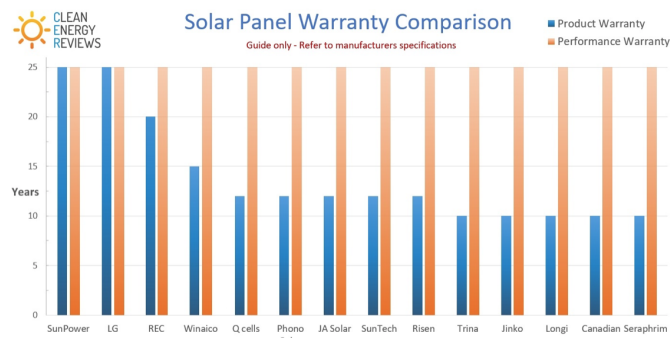


Figura 6.8: Comparativa períodes de garantia de producte i rendiment.[21] i [22]

Manufacturer	Model	Size (W)	Cell Type	Efficiency %
SUNPOWER	X22	360W	N-type IBC	22
LG	Neon R	370W	N-type IBC	21.4
SUNPOWER	E20	327W	N-type IBC	20.1
REC	N-Peak	330W	P-Type Mono Half-cut	19.8
LG	Neon 2	335W	N-type Mono	19.6
Q CELLS	QLPeak Duo	325W	P-Type Mono Half-cut	19.6
WINAICO	WSP-MX	330W	P-Type Mono PERC	19.4
JA SOLAR	JAM60S03	320W	P-Type Mono Half-cut	19.2
SUNREC Phono Solar	Twin Plus	320W	P-Type Mono Half-cut	19.2
Jinko	Eagle 60M	315W	P-Type Mono PERC	19.2
Trinasolar	Honey M Plus	315W	P-Type Mono PERC	19.2
LONGI Solar	LR6-60PD	315W	P-Type Mono PERC	19

Figura 6.9: Comparativa eficiència energètica. [21] i [22]

Una vegada revisades les gràfiques anteriors s'ha elegit el model SunPower X22-360. Totes les constants que apareixen en les equacions abans presentades es poden obtenir de les especificacions del model elegit.

Electrical Data		
	SPR-X22-360	SPR-X21-345
Nominal Power (P _{nom}) ⁷	360 W	345 W
Power Tolerance	+5/0%	+5/0%
Panel Efficiency	22.1%	21.2%
Rated Voltage (V _{mpp})	59.1 V	57.3 V
Rated Current (I _{mpp})	6.09 A	6.02 A
Open-Circuit Voltage (V _{oc})	69.5 V	68.2 V
Short-Circuit Current (I _{sc})	6.48 A	6.39 A
Max. System Voltage	1000 V IEC & 600 V UL	
Maximum Series Fuse	15 A	
Power Temp Coef.	-0.29% / °C	
Voltage Temp Coef.	-167.4 mV / °C	
Current Temp Coef.	2.9 mA / °C	

Figura 6.10: Especificacions de la placa SPR-X22-360. [23]

La corrent I_L és directament proporcional a la irradiació G , el que implica que a més sol, més irradiació i en conseqüència més corrent fotovoltaica. Quan es curtcircuita la cel·la, es pot negligir el flux de corrent en el díode. Com es pot observar a l'equació 6, la relació entre la temperatura i I_L és lineal. Per el model SunPower X22-360, I_L canvia de 6,48 A a 6,6103A (2%) quan la temperatura passa de 25°C a 75°C.

Quan la cèl·lula no es troba il·luminada, la relació entre el voltatge als terminals d'aquesta i la corrent be donada per l'equació de Shockley. Quan la cèl·lula es troba en circuit obert i il·luminada, és a dir $I=0$ i $I_L \neq 0$, la corrent travessa el díode.

Finalment el valor de saturació de la corrent I_0 a 25°C es calcula usant el voltatge en circuit obert i la corrent de curtcircuit a aquesta temperatura, (eq. 10).

Amb la intenció de validar el funcionament del mòdul elegit, s'han realitzat una sèrie de simulacions basades en les equacions abans explicades i la parametrització de Matlab.

```

A=0.92; %qualitat de díode, =2 cristal·lí <2 amorf
Vg=1.12; % band gap voltage, 1.12eV per cristal·lí| Si, 1.75 per Si amorf
Ns=32;%nombre de díodes connectats en serie
Np=1;
T1=273+25;
Voc_T1=69.5/Ns; %valors propis del model
Isc_T1=6.48/Np; %valors propis del model
T2=273+45;
Voc_T2=61.987/Ns; %valors propis del model
Isc_T2=6.6105/Np; %valors propis del model
TarK=273+TaC(s);
Tref=273+25;
Iph_T1=Isc_T1*Suns;
a=(Isc_T2-Isc_T1)/Isc_T1*(1/(T2-T1));
Iph=Iph_T1*(1+a*(TarK-T1));
Vt_T1=k*T1/q;
Ir_T1=Isc_T1/(exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
Ir_T2=Isc_T2/(exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b=Vg*q/(A*k);
Ir=Ir_T1*(TarK/T1).^(3/A).*exp(-b.*(1./TarK-1/T1));
X2v=Ir_T1/(A*Vt_T1)*exp(Voc_T1/(A*Vt_T1));
dVdI_Voc=-1.15/Ns/2;

```

Figura 6.11: Paràmetres Matlab SunPower X22-360

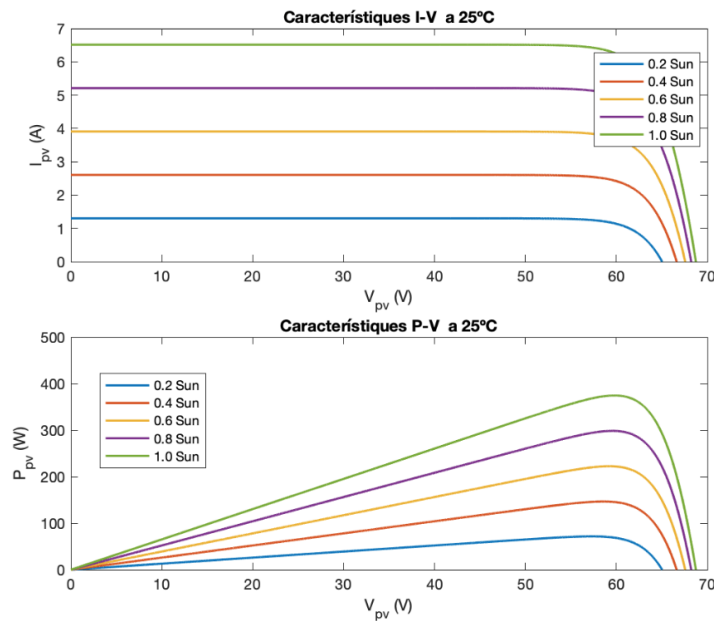


Figura 6.12: Corbes funcionament a diferents irradiacions

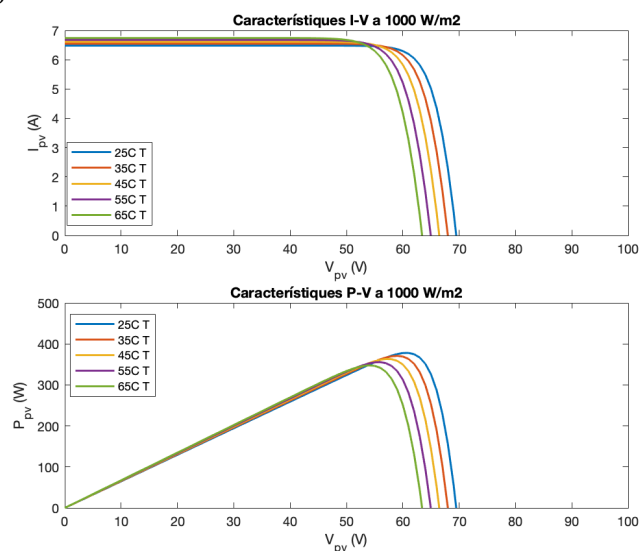


Figura 6.13: Corbes funcionament a diferents temperatures

Gràcies a les simulacions realitzades s'han obtingut les Figures 6.12 i 6.13, major irradiació es genera més potència a les plaques solars.

És interessant observar que la potència màxima a la qual la PV pot treballar va disminuint amb la temperatura. En el cas exposat la temperatura òptima seria al voltant de 25°C per un mateix valor de irradiància.

Aquests valors corresponen a un sol mòdul, el qual està compost per cèl·lules connectades en sèrie (per aquest model 96 cèl·lules). Es coneix com a matriu de plaques al conjunt de mòduls connectats en sèrie-parallel i que per tant generarà molta més energia.

Per l'objectiu d'aquest projecte, es necessita més potència generada per les plaques solars. Per això es realitza una simulació amb els mòduls connectats en sèrie i paral·lel per observar el comportament d'aquest conjunt. L'esquema general d'una matriu de mòduls es pot trobar a la Figura 6.14.

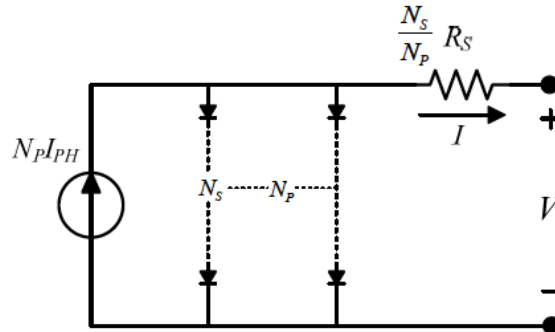


Figura 6.14: L'esquema es pot simplificar més eliminant la R_S . [24]

Per simular aquesta nova distribució es poden modificar els següents valors tal que:

$$V_{OC,N_S} = N_S \times V_{OC} \quad (13)$$

$$I_{SC,N_P} = N_P \times I_{SC} \quad (14)$$

La simulació s'ha realitzat suposant:

- model SunPower X22-360
- $T_C=25^\circ\text{C}$
- Diversos valors de radiació.
- $m_P=60$ mòduls
- $m_S=30$ moduls

El model SunPower X22-360 té una àrea de $1.63\text{m}^2/\text{modul}$, per tant per aquest cas el total d'àrea a simular és de 2934m^2 .

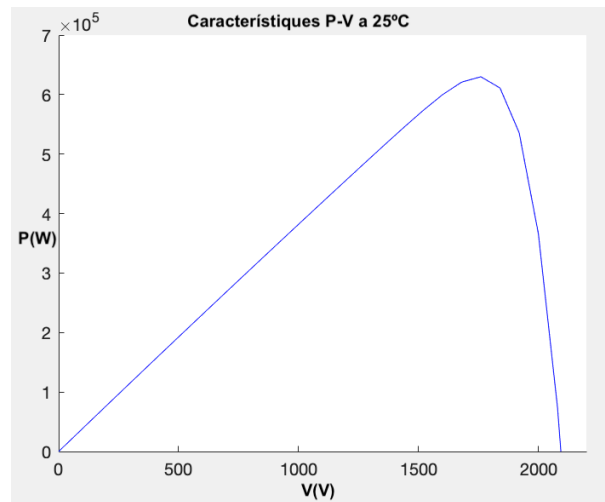


Figura 6.15: Corbes P-V obtingudes amb la configuració especificada

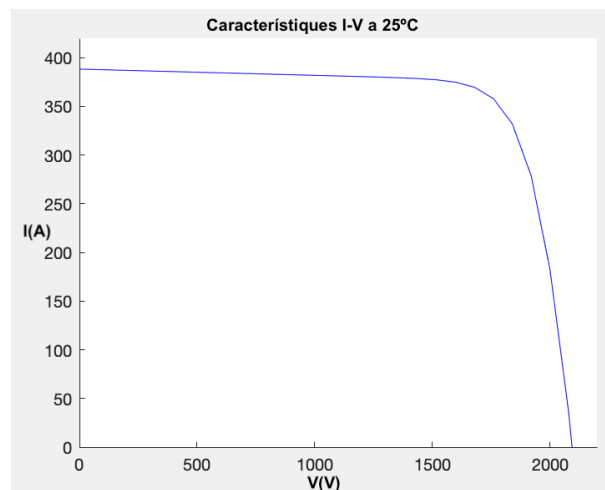


Figura 6.16: Corbes I-V obtingudes amb la configuració especificada

Com era d'esperar la potència generada és major degut a que l'àrea que absorbeix irradiació és també més gran. L'elecció del nombre de mòduls en paral·lel i en sèrie s'ha basat en trobar la configuració que permet generar potència compresa entre els kW i MW, i una corrent propera als 400 V.

A continuació es pot trobar l'esquema general del model utilitzat per fer les simulacions a partir de les equacions 5 a 13.

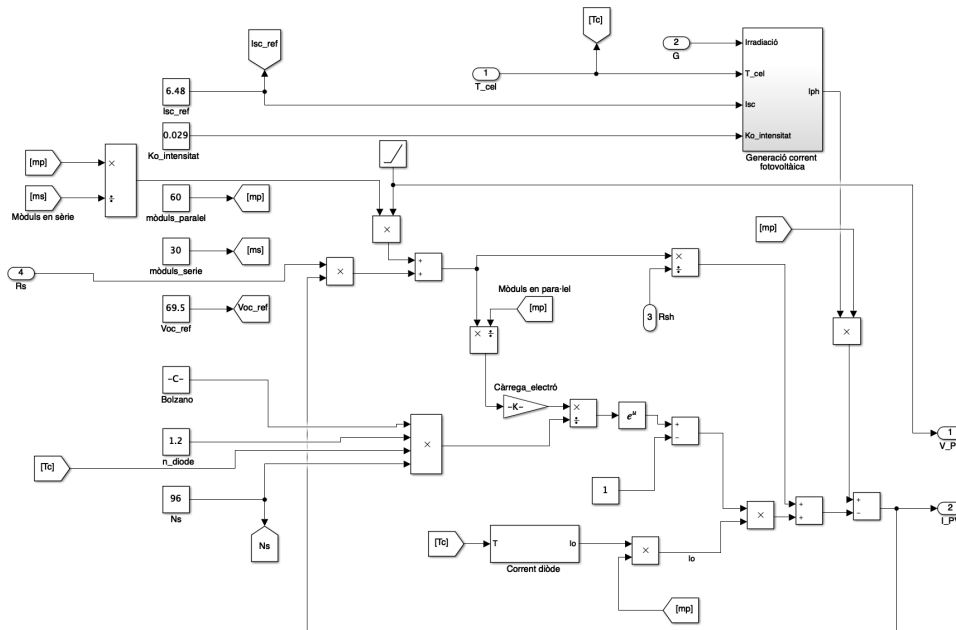


Figura 6.17: Esquema general per la simulació a partir de les equacions esmentades anteriorment

A l'annexe A.3 es pot trobar l'esquema desenvolupat de cada una de les parts del model de les plaques.

6.2.1 Maximum Power Point Tracking Algorithm

Finalment donada la baixa eficiència de les plaques fotovoltaïques, tot i que el model elegit té de les eficiències més altes del mercat, és interessant explicar i modelitzar el Maximum Power Point Tracking Algorithm (MPPT) [25].

El MPPT és una tècnica que permet a les plaques fotovoltaïques maximitzar la potència extreta de la irradiació solar. L'algoritme rastreja el voltatge que dona la potència màxima i amb aquest voltatge a màxima potència la placa solar determinarà automàticament la corrent a màxima potència. El control d'aquest algoritme s'explicarà més en detall a l'apartat de control.

6.3 Modelització del VSC

Com s'ha deliberat anteriorment el convertidor elegit és el convertidor VSC. Amb la intenció de simplificar l'estudi i el control d'aquest es substitueixen els sis IGBTs del model original (vegeu Figura 6.18).

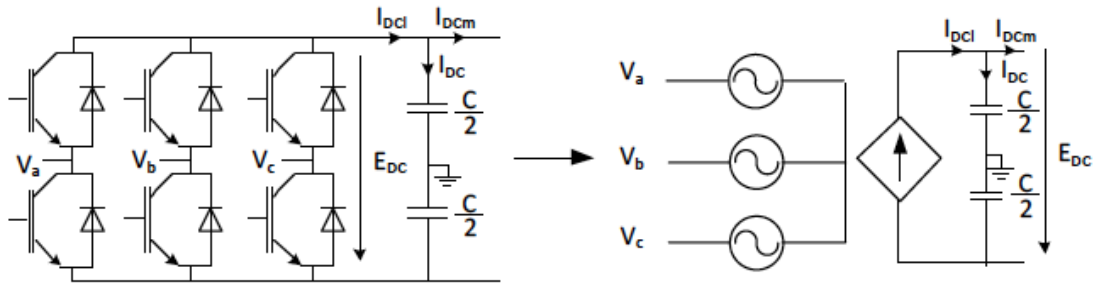


Figura 6.18: Model del VSC. [5]

Aquest model simplificat divideix el convertidor en dues parts: part AC i part DC. En el cas de la part alterna (AC) es modela com una font de voltatge i la part contínua (DC) com a font de corrent, com es pot apreciar a la imatge anterior. La font del corrent de la part contínua reflecteix la potència activa bescanviada entra la part alterna i contínua i assegura el balanç de potències del sistema.

La corrent que circula per la part contínua es pot calcular negligint les pèrdues de conversió com:

$$I_{DCI} = \frac{P_{AC}}{E_{DC}} \quad (15)$$

On,

- E_{DC} , és el voltatge de la part contínua
- P_{AC} , potència activa intercanviada entre el convertidor VSC i la xarxa alterna.

Mitjançant les equacions de voltatge es pot obtenir un esquema equivalent de la part alterna del convertidor que simplifica l'estudi.

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ v_{zb} \\ v_{zc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix} - (v_{ol} - v_{oz}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

On,

- v_{za}, v_{zb}, v_{zc} : són els voltatges instantanis de la xarxa en el marc abc
- v_{la}, v_{lb}, v_{lc} : són els voltatges instantanis del convertidor en el marc abc
- i_a, i_b, i_c : corrents instantanis en el marc abc
- $v_{lo}-v_{zo}$, és la diferència entre el convertidor i el neutre de la xarxa

D'aquestes equacions sen poden extreure el següent esquema (veure Figura 6.19). L'addició de resistències i inductàncies entre les dues fonts fa de filtre inductiu per realitzar la interconnexió entre les dues fonts de tensió, que a sobre fa de filtre per la modulació PWM.

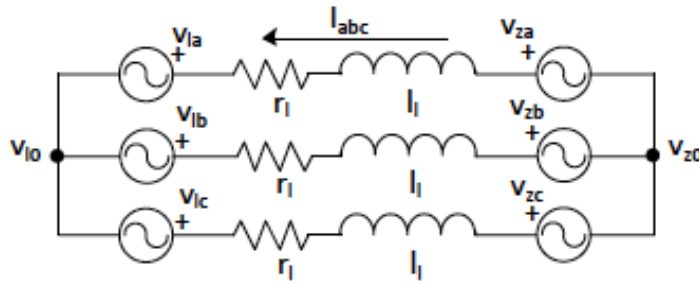


Figura 6.19: Model equivalent de la part alterna del VSC. [5]

En els casos on la xarxa no tingui neutre, es pot extreure que $v_{l0}-v_{zo}=0$ i les equacions de voltatge es poden simplificar a:

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ v_{zd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & l_l \omega_e \\ -l_l \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (17)$$

6.4 Modelització de la càrrega, bateries i línies de transport

Per aquest estudi es simplificaran les càrregues de la microxarxa a càrregues de valor constant. La manera més senzilla de modelitzar-les és mitjançant resistències en paral·lel connectades a la xarxa. La possibilitat de introducció de càrregues variables ha quedat descartada, ja que al tractar-se d'una xarxa petita de demanda de valor de kW es pot simplificar l'estudi usant càrregues fixes. L'element utilitzat a Matlab es pot representar com:

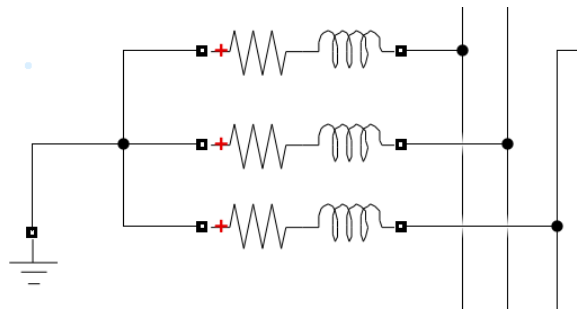


Figura 6.20: Equivalent de la càrrega

Pel que fa a les línies de transport s'han considerat ideals, per tant no es tenen pèrdues per conducció. Donades les dimensions de la microxarxa i les distàncies que hi hauria entre zona de generació i consum s'ha decidit simplificar l'estudi i agafar les línies com ideals.

Finalment com es presenta en l'apartat 6.3 les bateries es modelitzen com a fonts de corrent.

7 Control del sistema

En aquest apartat, s'explica el control de tres elements importants del sistema: els generadors (dièsel i fotovoltaics) i el sistema d'emmagatzematge. Les simulacions aquí presents o càlculs, estan basats en els apartats anteriors.

7.1 Control del generador dièsel

El controlador del generador dièsel es pot modelar de forma molt senzilla i no difereix del control de qualsevol tipus de motor dièsel, com el d'un cotxe. L'únic objectiu d'aquest és el de gestionar el flux de combustible que entra al motor per aconseguir i mantenir unes revolucions fixes, independentment de la càrrega a la qual es sotmet el motor.

Per això el model present a la Figura 7.1 s'ha implementat amb la intenció d'imitar el funcionament dels controladors, que normalment solen ser mecànics.

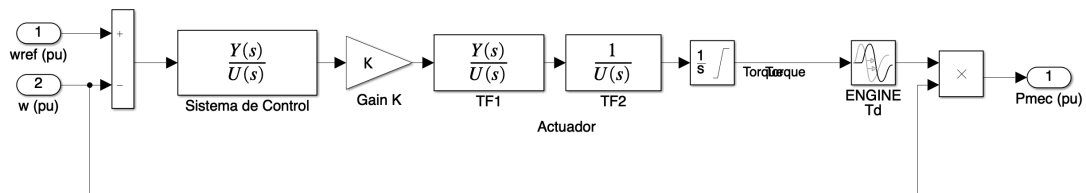


Figura 7.1: Model equivalent del control d'un *diesel generator* (DG).

La primera entrada és la velocitat de referència a la qual ha de treballar el motor i la segona entrada és la velocitat mesurada a la sortida del motor. Finalment la sortida de tot el sistema, és la potència mecànica que s'injecta en la màquina síncrona, necessària per la generació de energia elèctrica.

Les equacions que dirigeixen aquest controlador son dues,

$$Hc(s) = K \frac{1 + 0.2s}{1 + 0.01s + 2 \times 10^{-4}s^2} \quad (18)$$

$$Ha(s) = \frac{1 + 0.25s}{s(1 + 0.009s)(1 + 0.0384s)} \quad (19)$$

L'equació 18 representa el sistema de control i l'equació 19 el sistema actuador. Finalment, el motor es representa com a *time delay Td function*.

El model de generador dièsel juntament amb el seu control es pot trobar representat a la Figura 7.2.

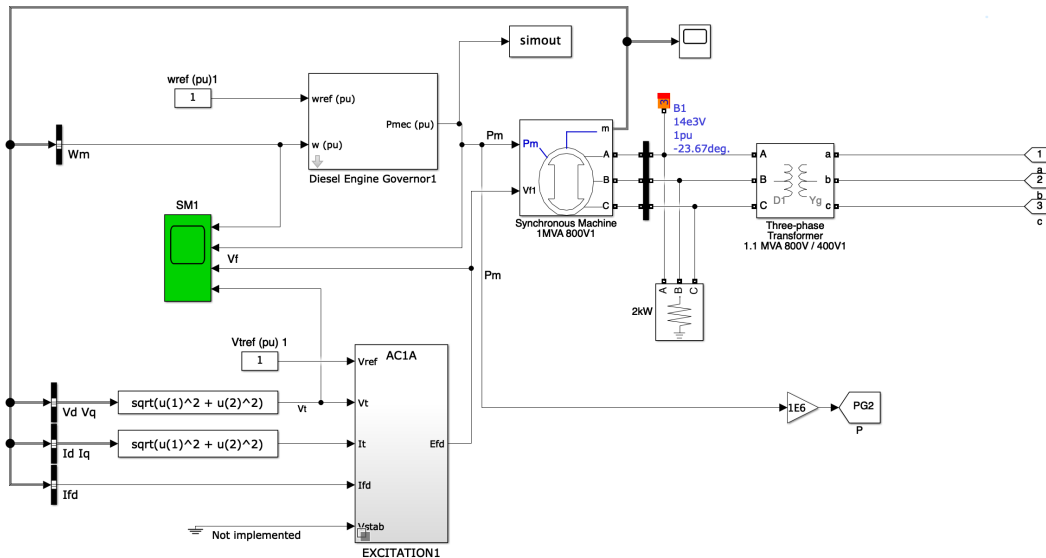


Figura 7.2: Generador dièsel complet amb el seu control

7.2 Control de les plaques solars

En el cas de les plaques solars estudiarem el control tant per el costat de la xarxa i com el control per part de les pròpies plaques.

7.2.1 Control costat PV

Com hem explicat en el capítol anterior en l'apartat referent a les plaques solars, s'intenta buscar que les plaques solars treballin sempre al seu punt màxim, el conegut MPPT. A partir dels punts de màxima potència V_{mp} i I_m , s'injecta aquesta potència a través d'un convertidor DC/DC que convertirà el V_{mp} a $E_{DC}=800$ V.

Hi ha diferents mètodes per implementar el MPPT, però degut a la simplificació de l'estudi, amb un mètode senzill podrem obtenir la potència màxima. El mètode Hill Climbing s'ha elegit com a model degut a la seva senzilla implementació i a més no requereix un controlador per el convertidor de potència. L'algoritme de funcionament es pot explicar de manera esquematitzada i senzilla com es veu a la Figura 7.5 .

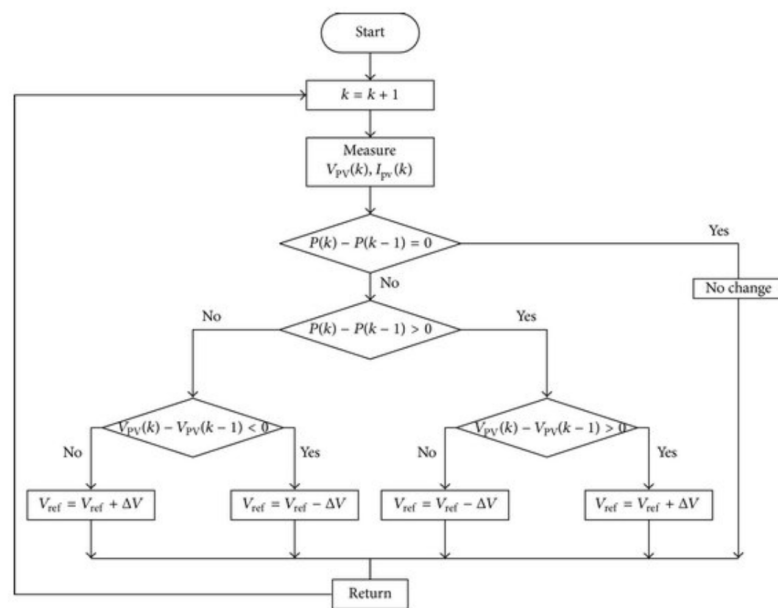


Figura 7.3: Algoritme de funcionament MPPT. [25]

El mètode calcula directament el Duty Cycle (D), els canvis del qual depenen directament dels canvis de la potència i el voltatge de les plaques solars com es pot veure a la Taula 7.1. Aquesta

ΔP_{PV}	ΔV_{PV}	Pertorbació Duty Cycle
Augmenta	Augmenta	Disminueix
Augmenta	Disminueix	Augmenta
Disminueix	Augmenta	Augmenta
Disminueix	Disminueix	Disminueix

Taula 7.1: Mètode The Hill Climbing

pertorbació es dóna cada 400 η s amb un pas de cicle del 0.1%. Finalment, aquesta comprovació constant permet que el MPPT oscil·li sempre al voltant del valor de màxima potència.

A més serà necessari convertir el voltatge obtingut de les plaques solars a un major. L'esquema d'aquest convertidor és molt senzill ja que està format per elements molt senzills com es veu a la Figura 7.4 .

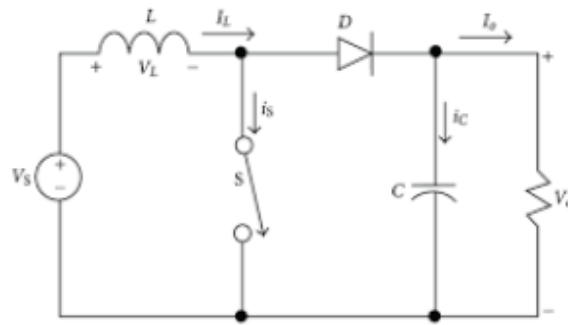


Figura 7.4: Esquema convertidor DC/DC boost.

L'interruptor es controla mitjançant la tècnica PWM que es pot descriure per el duty cycle.

Una vegada més el model plaques fotovoltaïques + MPPT + DC/DC boost converter s'ha simplificat per facilitar l'estudi i la simulació del sistema.

L'algoritme presentat anteriorment s'ha utilitzat per implementar el MPPT juntament amb el DC/DC boost converter, el qual es modelitza segons les Figures 7.5 i 7.6 .

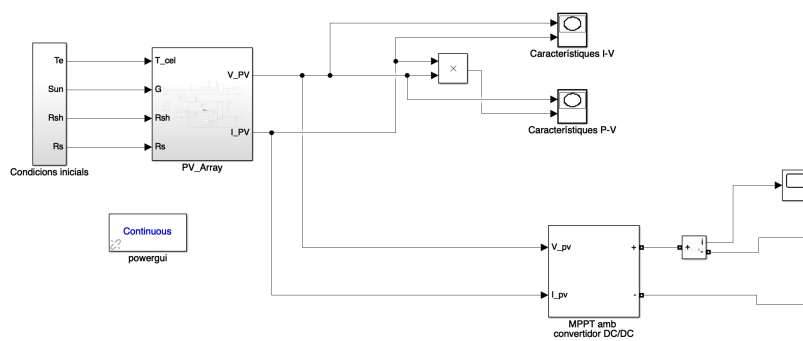


Figura 7.5: Esquema de les plaques solars ampliat amb l'algoritme i el convertidor.

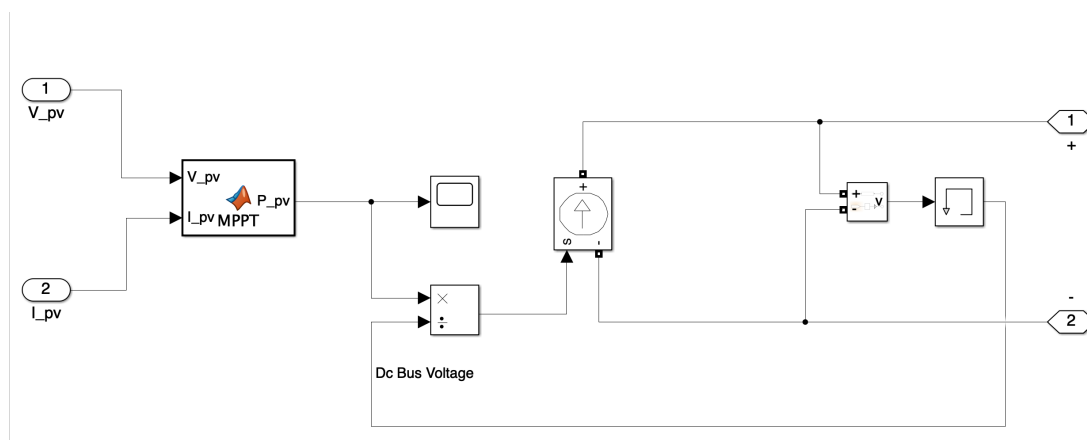


Figura 7.6: MPPT treballant conjuntament amb el DC/DC boost converter.

El model assoleix més o menys ràpidament el MPP segons el pendent del voltatge que s'ha definit en les plaques solars. La simplificació del DC/DC boost converter ens permet seguir la següent equació:

$$I_{DC} = \frac{P_D}{V_{Bus\ DC}} \cong \frac{P_{mp}}{800V} \quad (20)$$

El conjunt presentat ens permet obtenir els següents resultats.

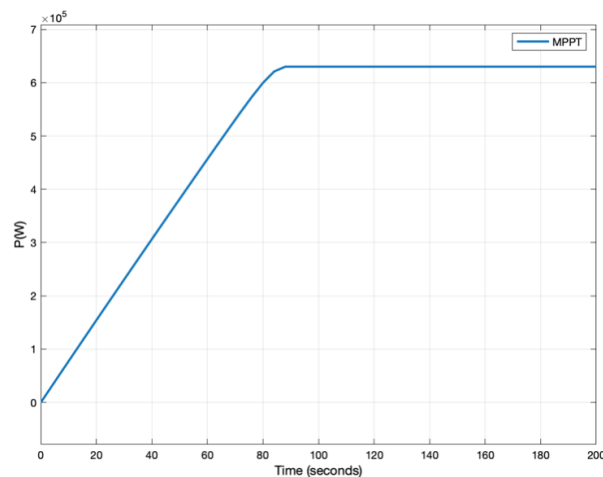


Figura 7.7: Potència injectada a la xarxa contínua

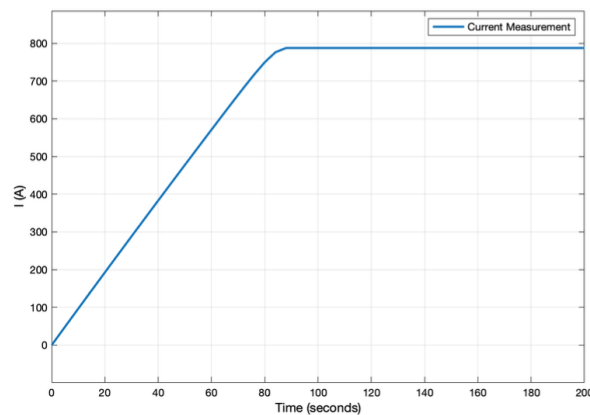


Figura 7.8: Corrent a la xarxa contínua

Totes aquestes simulacions s'han fet amb les corbes I-V i P-V del model SunPower X22-360 i la configuració especificada en l'apartat de modelització.

7.2.2 Control costat xarxa

Seguint l'aprenentatge absorbit del capítol: *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems* [5], la manera més senzilla de representar les plaques fotovoltaïques

és mitjançant una font de corrent continu i un condensador en paral·lel, que és el que s'ha assolit en l'apartat anterior mitjançant el *DC/DC boost converter*.

L'esquema de control del convertidor es pot trobar a la Figura 7.9, basat en un sistema de control de dos nivells. El controlador interior i exterior. L'interior permet controlar la corrent alterna en la referència $q d 0$, mentre que el controlador exterior permet regular el voltatge continu en la mateixa referència.

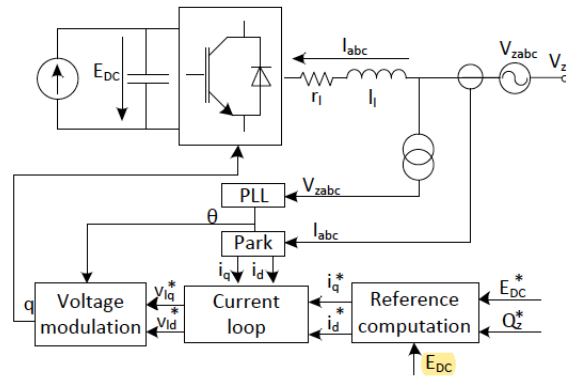


Figura 7.9: Esquema de control del VSC adaptat a energia fotovoltaica. [5]

Degut que ambdós controladors treballen en la referència $q d 0$, mitjançant la rotació de la referència per ajustar l'angle elèctric de la xarxa. Per aquest motiu es fa ús del PLL, és conegut com Phase Locked Loop que permet fer un seguiment de l'angle de la xarxa. Aquest angle permet realitzar la transformada i antitransformada de Park, tant necessàries pel control del sistema.

7.2.2.1 Current Loop Controller

L'objectiu del Current Loop Controller és el de calcular el voltatge que el VSC ha d'aplicar ($v_{l,q}$ i $v_{l,d}$) per assegurar que la corrent que flueix a través del convertidor és la mateixa que la que el controlador té de referència (i_q^* , i_d^*).

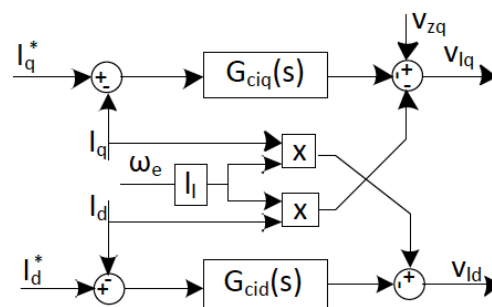


Figura 7.10: Esquema Current Loop Controller

Si s'assumeix que $v_{zd}=0$, suposició que s'explicarà a continuació, les equacions de voltatge es

poden escriure com

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & l_l \omega_e \\ -l_l \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (21)$$

on es pot veure la relació entre les components q i d del voltatge i de la corrent, les quals es poden controlar de manera independent.

Desacoblant les components q i d del voltatge i integrant-les dins les equacions il·lustrades anteriorment s'obté,

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zq} - l_l \omega_e i_{ld} \\ -\hat{v}_{ld} + l_l \omega_e i_{lq} \end{bmatrix} \quad (22)$$

A continuació aplicant la transformada de Lapalace, les funcions de transferència entre el controlador i el convertidor es poden escriure com

$$\frac{\hat{v}_{lq}(s)}{i_q(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l} \quad (23)$$

$$\frac{\hat{v}_{ld}(s)}{i_d(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l} \quad (24)$$

El controlador per les funcions de transferència anteriors es pot dissenyar utilitzant la tècnica Internal Model Control que permet obtenir el controlador,

$$G_{ciq}(s) = G_{cid}(s) = \frac{K_p s + k_i}{s} \quad (25)$$

Amb les constants corresponents,

$$K_p = \frac{l_l}{\tau} \quad (26)$$

$$K_i = \frac{r_l}{\tau} \quad (27)$$

Aquestes constants es definiran posteriorment a l'apartat de simulació.

Finalment per tal d'obtenir els valors de referència i_q^* i i_d^* de les potències activa i reactiva P^* i Q^* , es seguirà la teoria de potència tal que,

$$P^* = \frac{3}{2}(v_{zq} i_q^* + v_{zd} i_d^*); Q^* = \frac{3}{2}(v_{zq} i_d^* - v_{zd} i_q^*) \quad (28)$$

Com s'ha definit, $v_d=0$ per tant i_q^* i i_d^* es poden obtenir com

$$i_q^* = \frac{2}{3} \frac{P^*}{v_{zq}} \quad (29)$$

$$i_d^* = \frac{2}{3} \frac{Q^*}{v_{zq}} \quad (30)$$

El valor de la potència reactiva Q^* es fixarà a un valor i el valor de la potència activa P^* s'ajustarà per regular el voltatge continu.

7.2.2.2 Voltage Controller

L'objectiu del controlador de voltatge és vigilar que hi ha balaç entre la potència generada per les plaques fotovoltaïques i la potència injectada a la xarxa. Aquesta part del circuit a més permet obtenir els valors de P^* i el de i_q^* com bé explica la Figura 7.11.

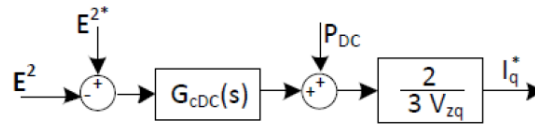


Figura 7.11: Esquema Voltage Controller. [5]

El valor de E^{2*} correspon al valor de E^{2*}_{DC} el qual es compara amb el valor de E^{2}_{DC} obtingut en borns del condensador en la part contínua. Finalment la sortida del controlador és la potència activa injectada per el condensador P^*_{DC} .

Aquesta energia s'afageix a la mesurada just abans del condensador P_{DC} , el que permet obtenir la potència activa P^* per calcular i_q^* .

$$P^* = P^*_C + P_{DC} \quad (31)$$

Els valors del controlador PI es poden calcular com,

$$K_{PDC} = C\xi_E\omega_E \quad (32)$$

$$K_{IDC} = \frac{C\omega_E^2}{2} \quad (33)$$

On C és el condensador de la part contínua del convertidor, ω_E és la velocitat angular desitjada en el bucle del voltage i ξ_E és el *damping ratio* del bucle.

7.2.2.3 Phase Locked Loop

El PLL és un sistema on la fase i la freqüència son realimentades. S'utilitza per determinar l'angle i la velocitat angular de una xarxa elèctrica. L'altre objectiu és la d'estabilitzar v_d a 0, motiu pel qual a l'apartat anterior s'assegura que $v_{zd}=0$. L'esquema general d'un PLL es pot representar com a la Figura 7.12

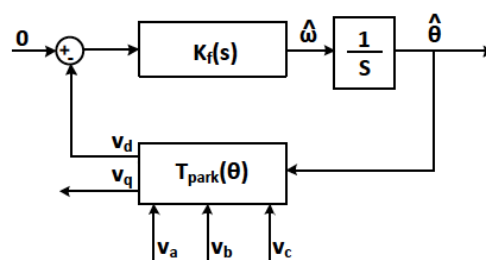


Figura 7.12: Phase Locked Loop. [5]

Consisteix en la realimentació de la component d del voltatge que és filtrada per un controlador PI. La sortida d'aquest controlador és la velocitat angular estimada de la xarxa i el seu angle (mitjançant l'integrador).

Mitjançant la linearització es poden obtenir les equacions del sistema, necessàries per obtenir els valors de les constants del controlador PI:

$$K_f(s) = (K_{p,PLL} + \frac{K_{i,PLL}}{s}) + w_e \quad (34)$$

$$K_{i,PLL} = \frac{1}{\tau_{PLL}} \quad (35)$$

$$w_e = 2\pi f_e \quad (36)$$

El model complet de les plaques fotovoltaïques amb el seu controlador es pot trobar representat a la Figura 7.13.

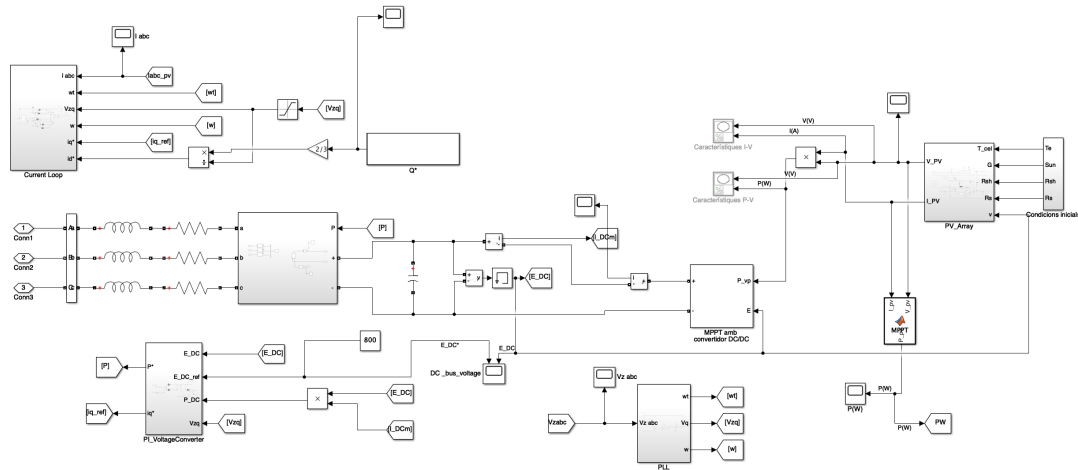


Figura 7.13: Plaques solars + VSC + MPPT

7.3 Control sistema d'emmagatzematge

Com bé s'ha explicat anteriorment, el sistema d'emmagatzematge es pot representar com a font de voltatge. Només serà necessari el control de la potència activa de càrrega i descàrrega, i la potència activa entregada pel convertidor.

7.3.1 Control costat xarxa

En el cas del costat de la xarxa, si que és necessari l'ús de controladors. De manera semblant al cas de les plaques fotovoltaïques, una sèrie d'elements són necessaris juntament al VSC com es pot veure a la Figura 7.14.

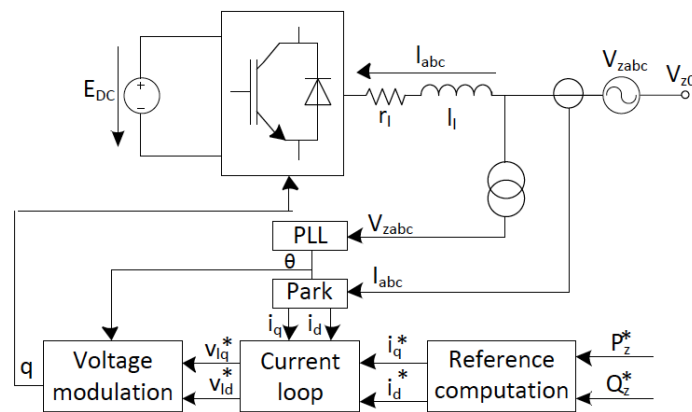


Figura 7.14: Esquema del control del VSC per sistemes d'emmagatzematge. [5]

En el cas del PLL, tant la font com les bateries estan connectats a la mateixa xarxa, per tant només és necessari implementar el PLL una vegada. El disseny al ser genèric serà l'explicat a l'apartat anterior.

De la mateixa manera, el *Current Loop controller* serà dissenyat seguint les directrius del controlador explicat per les plaques fotovoltaïques.

Finalment la única part que diferencia el sistema de generació d'un sistema de emmagatzematge es troba en l'apartat 7.2.2.2. A diferència de les plaques fotovoltaïques, les bateries no requereixen el controlador ja que la potència activa de referència d'aquestes s'ajusta per tal de carregar o descarregar les bateries depenent de les necessitats de la xarxa. Per tant les equacions 29 i 30 s'utilitzaran directament per calcular les respectives corrents de referència a injectar al *Current Loop Controller*.

El model complet del sistema d'emmagatzematge es pot trobar a la Figura 7.15. Es pot observar com s'ha imposat que la tensió a les bateries sigui sempre la mateixa, 800 V. Aquest fet s'ha donat perquè es pot considerar que la tensió no varia per simulacions curtes.

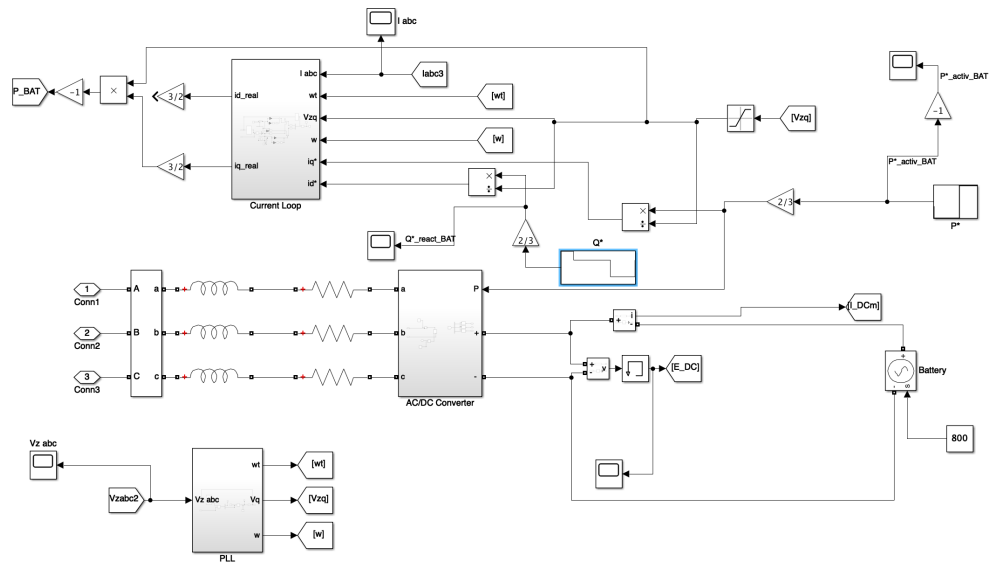


Figura 7.15: Bateries + VSC

8 Simulacions i resultats

En aquest apartat s'exposaran les diferents simulacions realitzades per estudiar el comportament del sistema i la seva capacitat d'estabilitzar-se amb la intenció de abastir d'energia de forma ininterrompuda. Primerament es presentaran els diversos paràmetres utilitzats per les simulacions i posteriorment els resultats d'aquestes.

L'esquema de la Figura 8.1 representa la microxarxa en la seva expressió més general, el que implica que segons la simulació a realitzar s'afegiran o s'eliminaran diversos components, que s'exposaran a continuació.

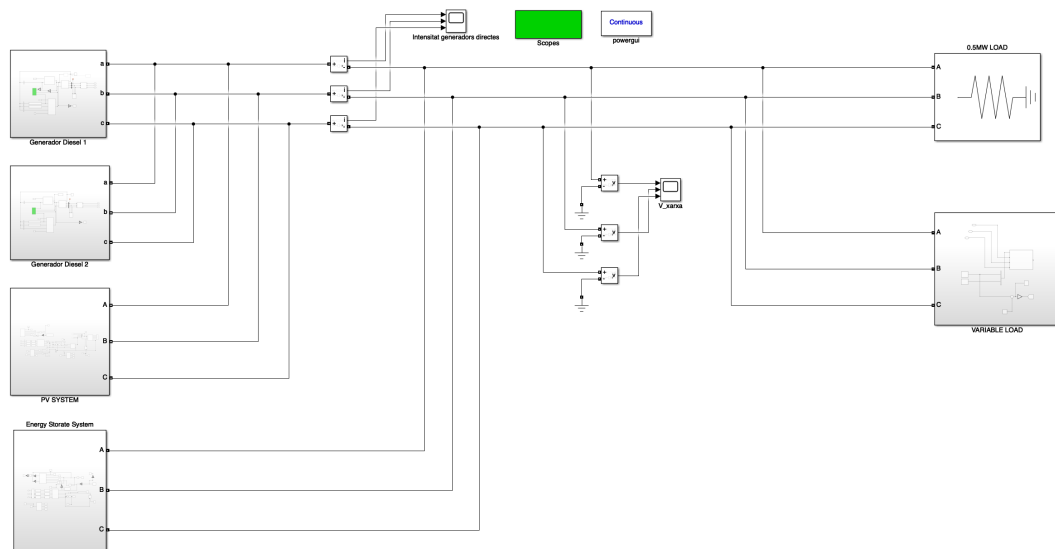


Figura 8.1: Esquema general de la microxarxa dissenyada.

Totes les simulacions es realitzaran amb un interval de 24 segons per representar un dia complet. El model s'ha simulat usant els segons degut a que la complexitat dels elements simulats i els recursos disponibles per l'estudiant, no és possible realitzar simulacions a temps real que portarien molt temps de simulació. En canvi simular 24 segons en mode accelerat, implicava un total de 10 minuts de computació per part del software Matlab. És important remarcar que tot i que la simulació es faci a 24 segons, quan el sistema s'estabilitzi ho farà ràpidament, sense que impliqui que a la realitat tardi hores en estabilitzar-se.

Seguint el mateix argument, els patrons de irradiància, temperatura i demandes s'han modelat seguint els mateixos patrons.

8.1 Paràmetres

Els paràmetres generals es presenten en el següent apartat. Aquells paràmetres que depenguin de la simulació a realitzar s'explicaran en el corresponent apartat. Degut a que les dimensions de la xarxa no són molt grans, tot i que si ho són les potències a les que treballa la xarxa, es modelitzarà a una tensió nominal de 400 V. Aquesta combinació de valors resultarà en unes

intensitats de la xarxa prou altes, però després de fer recerca s'ha trobat que hi ha models de convertidors que treballen a aquestes intensitats, com els models de *SMA Energy*. [27]

8.1.1 Paràmetres generador dièsel

Presentades les formules del generador dièsel a l'apartat 7.1 s'ha fet un estudi per l'elecció del paràmetre K de les funcions de control del generador.

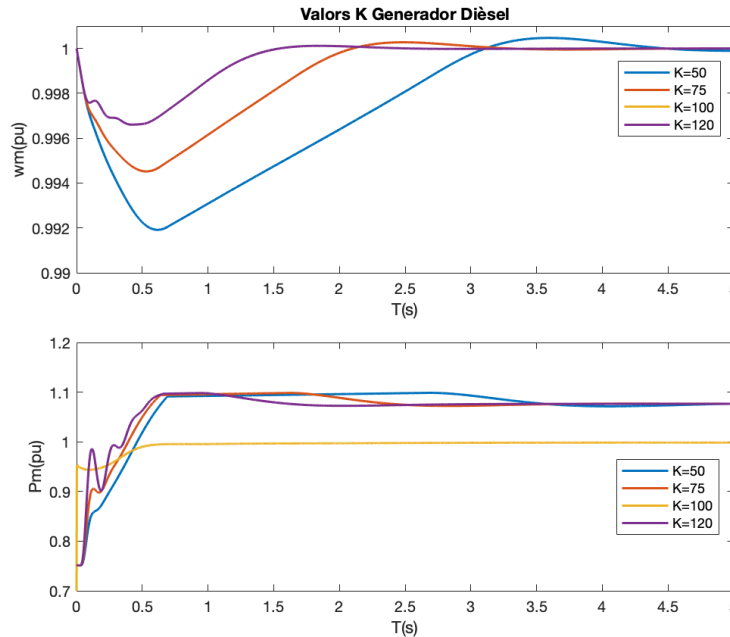


Figura 8.2: Estabilitat del generador per diferents valors de K .

Com es pot observar a la Figura 8.2 el generador s'estabilitza més ràpidament per $K=120$. Degut a que el sistema es sotmetrà a diverses simulacions que requeriràn la ràpida resposta dels diversos generadors, s'ha elegit aquest valor de K com l'utilitzat en tot l'estudi que engloba aquest projecte. La resta de paràmetres requerits al generador dièsel són una generació a 800 V, funcionament a 50 Hz i potència màxima de 1MW. És important remarcar que per veure més interacció entre generadors, s'ha decidit utilitzar dos generadors en lloc de només un per així poder realitzar major nombre de simulacions.

8.1.2 Paràmetres energia fotovoltaica

Com s'ha explicat en apartats anteriors les plaques solars utilitzades són les *SunPower X22-360*, les quals s'han combinat en sèrie i paral·lel per obtenir una potència que pugui competir amb la generada per els generadors dièsel. Un total de 1800 mòduls han sigut necessaris per assolir una potència que pugui abastir les diferents demandes de les simulacions a realitzar. Aquestes s'han connectat com

$$N_{mòduls,s} = 30 \quad (37)$$

$$N_{mòduls,p} = 60 \quad (38)$$

L'elecció d'aquests valors s'ha basat per una part en la tensió i la corrent que es desitjava assolir com bé s'exposa en l'apartat 6.2.

Els perfils de temperatura i irradiància s'han dissenyat per representar, amb la màxima precisió possible, els perfils que corresponen a un dia normal de sol [28].

Els perfils es poden veure a la Figura 8.3 i la Figura 8.4.

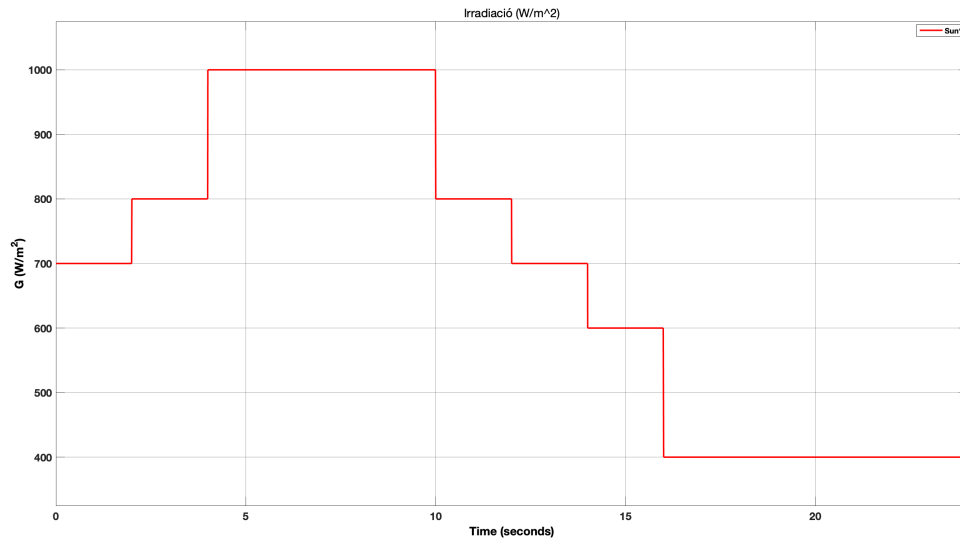


Figura 8.3: Evolució irradiància durant la simulació. [28]

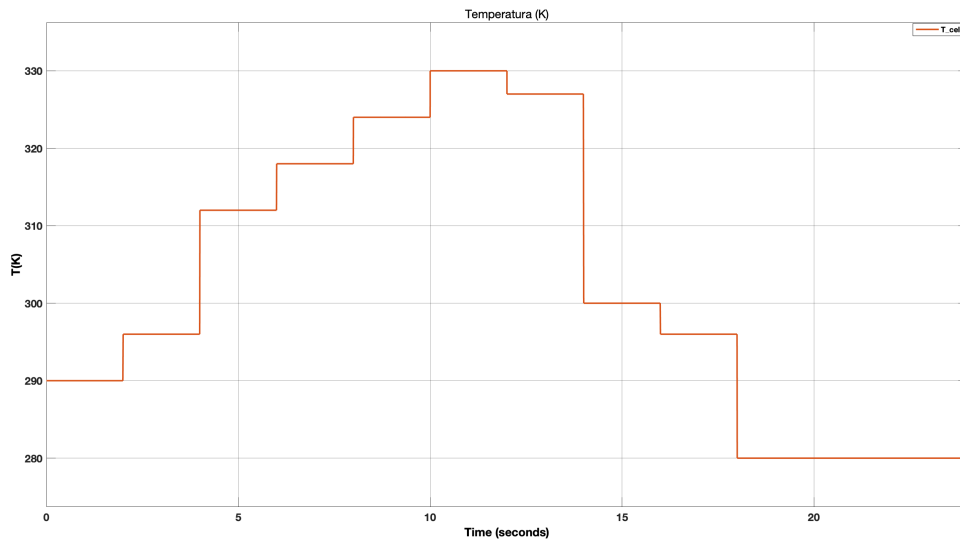


Figura 8.4: Evolució temperatura durant la simulació. [28]

La potència reactiva entregada a la xarxa per part de les plaques fotovoltaïques es pot trobar representada a la Figura 8.5.

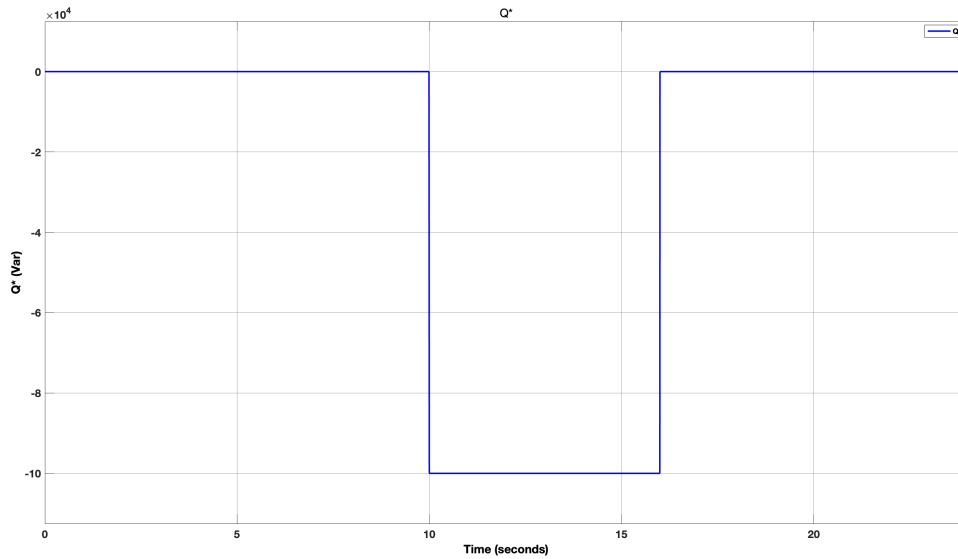


Figura 8.5: Potència reactiva desitjada injectada per les plaques fotovoltaiques.

Per el convertidor VSC de les plaques solars els valors que s'han agafat són els següents:

$$r_l = 0,5 \, \Omega$$

$$l_l = 5,4 \, \text{mH}$$

$$C = 1020 \, \mu\text{F}$$

Els paràmetres del controlador VSC són

$$\omega_n = 418,88 \, \text{rad/s}$$

$$\xi_{DC} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\tau_{\text{control-loop}} = 1 \, \text{ms}$$

Tots aquests valors s'han agafat de [5], referència usada per el disseny del VSC, el qual opera al mateix rang de voltatge que la xarxa aquí present i per tant compatible amb les constants elegides.

8.1.3 Paràmetres *Energy Storage System*

Com s'ha explicat anteriorment la bateria es modelitzarà com a font controlada de voltatge. Per tant el voltatge desitjat al qual operarà el sistema de bateries és de 800 V, per poder treballar al rang de voltatge del VSC.

Els valors corresponents al VSC de la bateria també s'han extret de l'article [5] i en aquest cas només son necessaris $r_l = 0,5 \, \Omega$, $l_l = 5,4 \, \text{mH}$ i $\tau_{\text{control-loop}} = 1 \, \text{ms}$.

Els valors de referència de la potència activa i reactiva de la bateria seguiran el patró de la Figura 8.6 i la Figura 8.7.

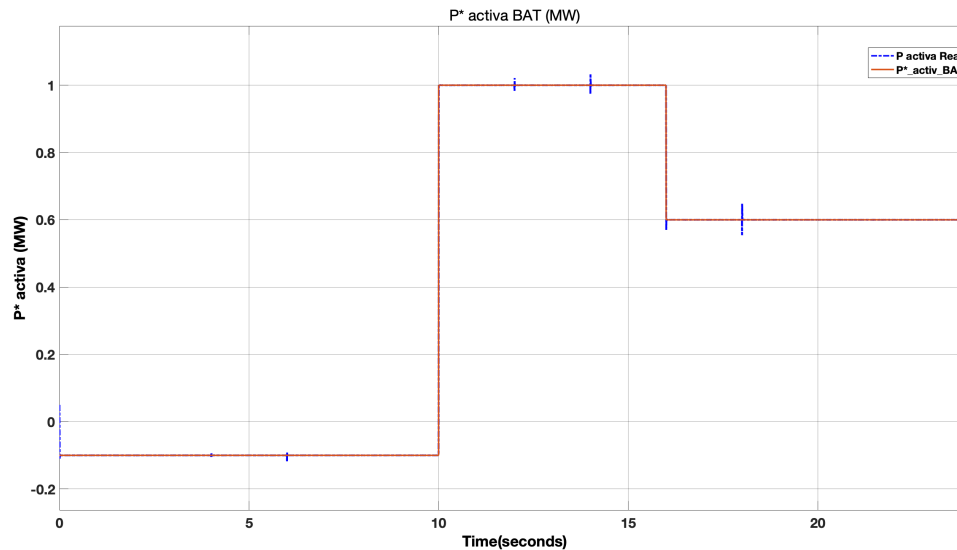


Figura 8.6: Potència activa desitjada injectada i consumida per les bateries.

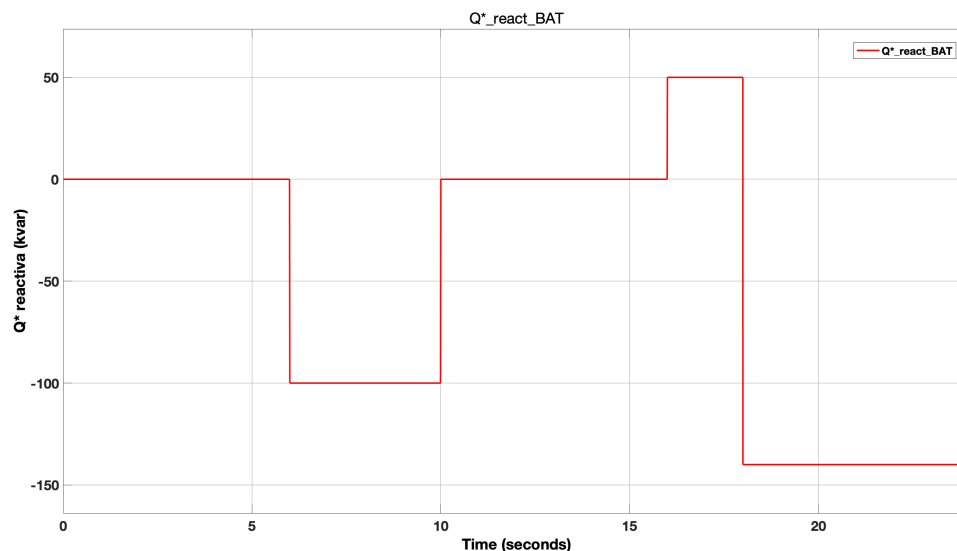


Figura 8.7: Potència reactiva desitjada injectada i consumida per les bateries.

8.2 Simulacions

Durant tot el procés de realització d'aquest treball s'han realitzat moltes simulacions. Unes per verificar el correcte funcionament de cada un dels components principals del sistema i altres per verificar el funcionament del control del sistema. Aquestes simulacions individuals no es presentaran ja que l'objectiu del projecte és la de operar i controlar la microxarxa en el seu conjunt. Per aquest motiu, diversos tipus de simulacions s'han realitzat tant per comprovar el funcionament general del conjunt com per veure la resposta dels components enfront grans canvis de demanda o producció durant un dia d'operativa de la xarxa.

La primera simulació es realitzarà per comprovar el funcionament general de la microxarxa en

un dia sense grans canvis de demanda ni caigudes en la producció amb l'objectiu de comprovar l'estabilitat del sistema enfront unes condicions estables. Es realitzaran una sèrie de simulacions amb canvis de demanda i de potència.

Finalment es realitzarà una caiguda d'un dels generadors dièsel per veure com els altres generadors responen per tal de mantenir la demanda de potència i com responen tots els components implicats.

8.2.1 Estudi funcionament normal de la microxarxa

Per aquest estudi s'ha imposat a la càrrega una demanda de 2 MW constants.

A la Figura 8.8 i la Figura 8.9 es pot observar el comportament de les corrents i_d i i_q . Aquests varien segons la potència reactiva especificada en els paràmetres i la potència activa generada per les plaques solars (Figura 8.10).

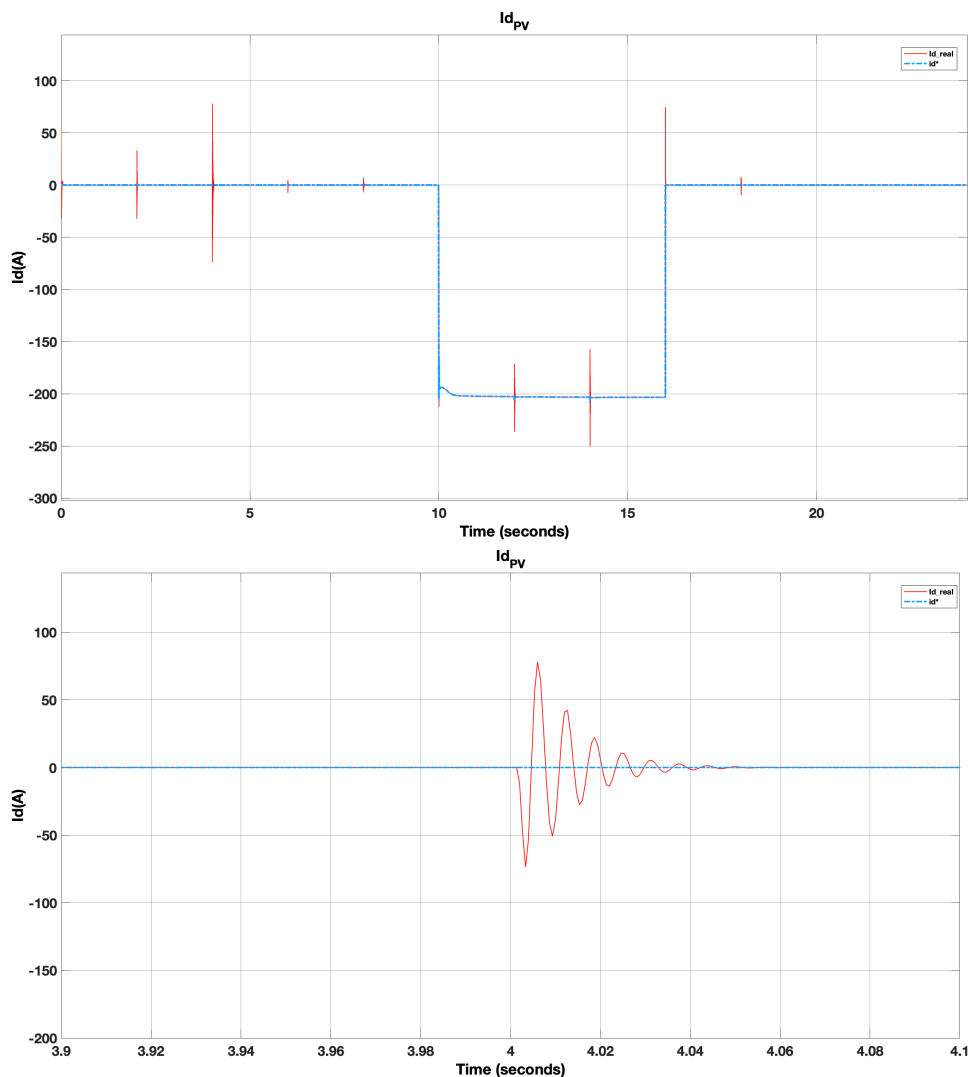


Figura 8.8: Valors de referència i reals de la i_d generada per les plaques fotovoltaïques.

Com es pot observar en la segona imatge, el valor real de i_d s'estabilitza molt ràpidament seguint la constant $\tau_{\text{control-loop}} = 10 \text{ ms}$, arribant al 98% del valor final després de $4\tau_{\text{control-loop}}$. Això permet verificar el correcte funcionament del Control Loop que permet estabilitzar el sistema amb la rapidesa que se li demana. També es pot veure com es generen pics molt grans, deguts a que els canvis d'irradiància són sobtats. En la realitat aquests canvis no serien així ja que la radiació i la temperatura sofreixen un canvi progressiu.

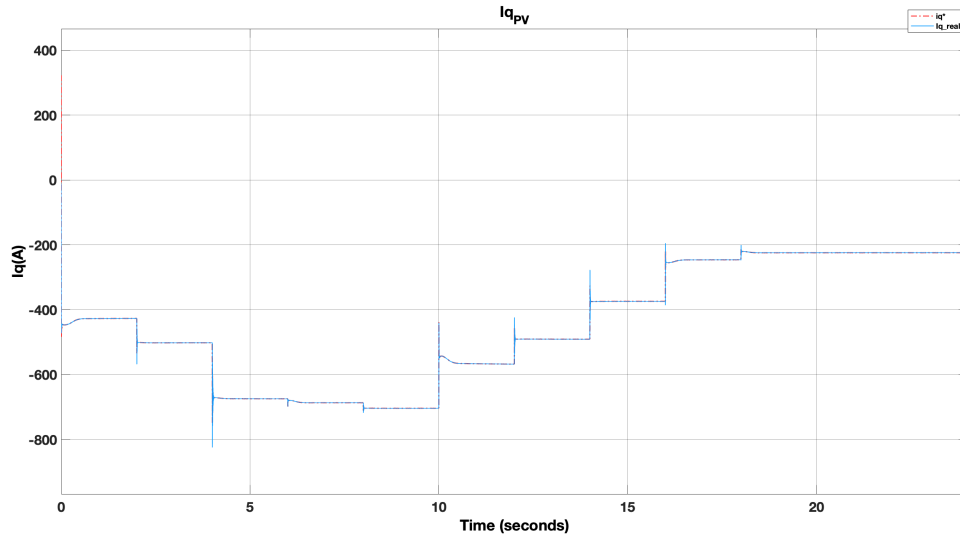


Figura 8.9: Valors de referència i reals de la I_q generada per les plaques fotovoltaïques.

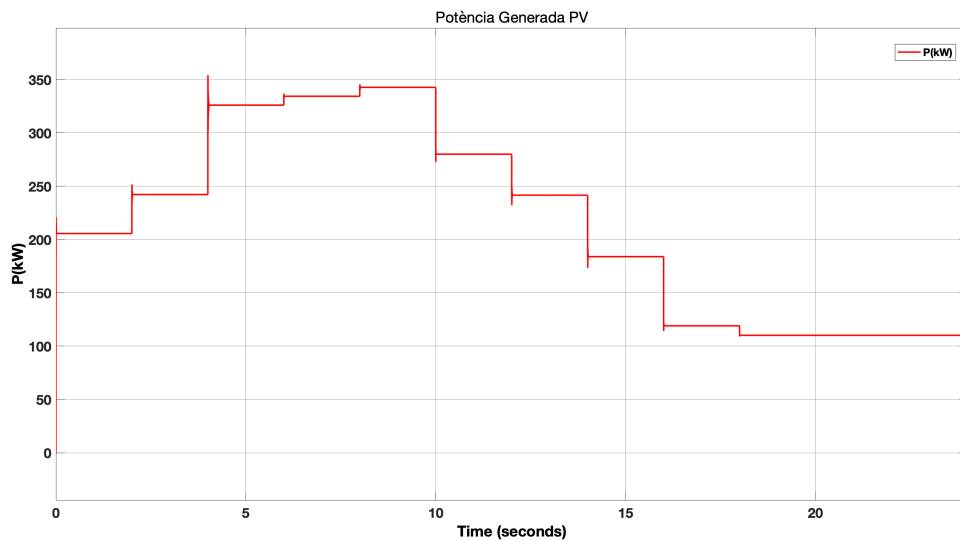


Figura 8.10: Potència generada per les plaques solars segons la irradiació i la temperatura.

Com es pot observar en les Figures 8.9 i 8.10, la i_d segueix un perfil similar al de la potència generada per les plaques solars. L'estabilització dels valors reals enfront dels valors de referència també es produeix amb la mateixa rapidesa que la de la corrent de la potència reactiva, el que permet assegurar el bon funcionament del VSC.

Referent a les bateries, com que s'estudien amb la mateixa demanda o producció d'energia no-més s'explicaràn en aquesta simulació i els resultats de comportament es podràn extrapolar a les altres simulacions posteriors. En les Figures 8.11 i 8.12 es pot veure la evolució de i_q i i_d que depenen dels valors de potència activa i reactiva especificats en l'apartat de paarametres 8.1.3.

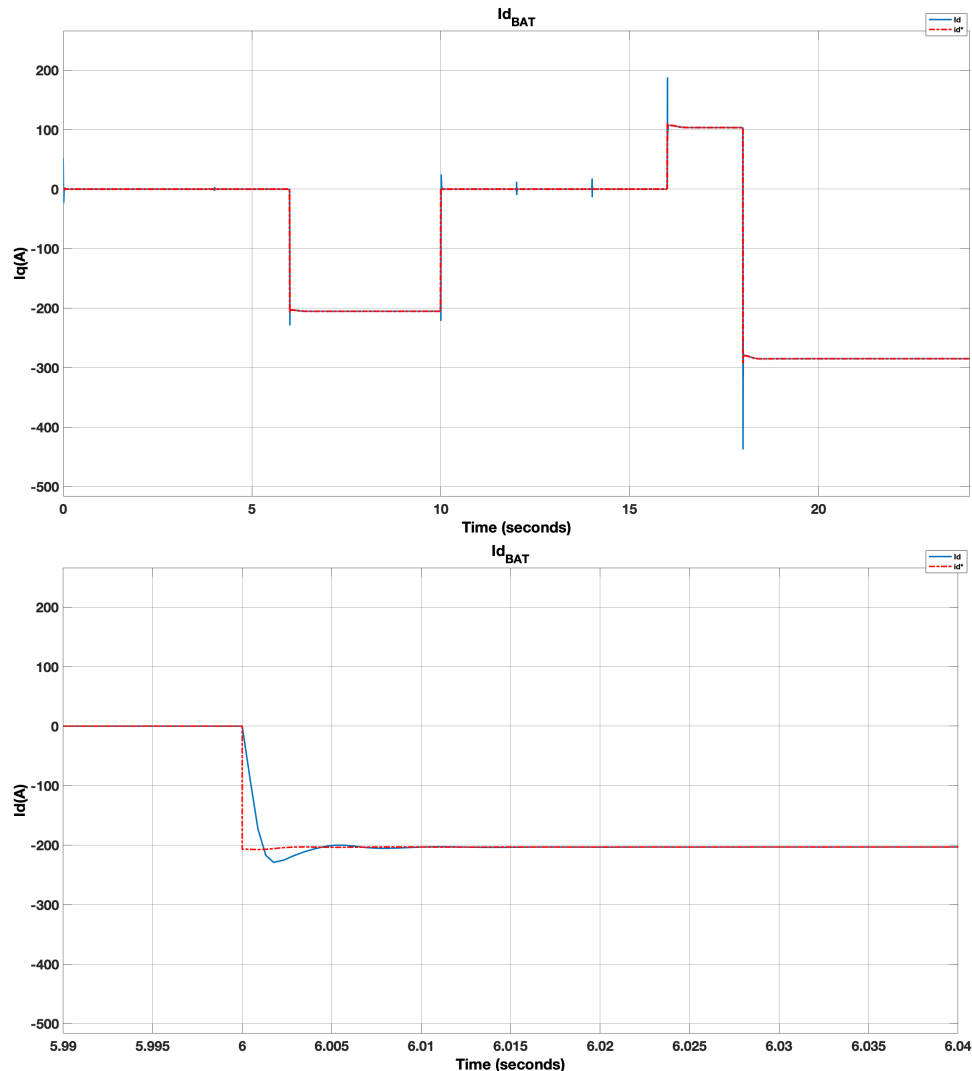


Figura 8.11: Valors de referència i reals de la i_d consumida (intensitats positives) i generada (intensitats negatives per les bateries)

Com en el cas de les plaques fotovoltaïques davant pertorbacions importants de la microxarxa, el VSC de les bateries s'estabilitza molt ràpidament com es pot veure a l'ampliació de la Figura 8.11.

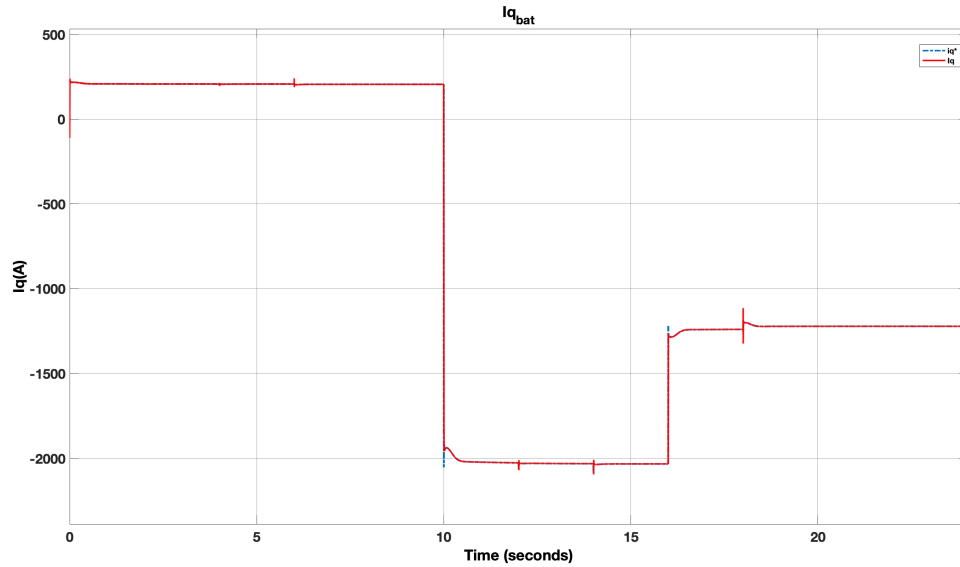


Figura 8.12: Valors de referència i reals de la i_q consumida (intensitats positives) i generada (intensitats negatives) per les bateries.

En la Figura 8.13 es pot observar el funcionament dels generadors dièsel i com s'adapten en aquest cas als canvis generats per la producció canviant de les plaques fotovoltaïques i del consum o generació de les plaques solars.

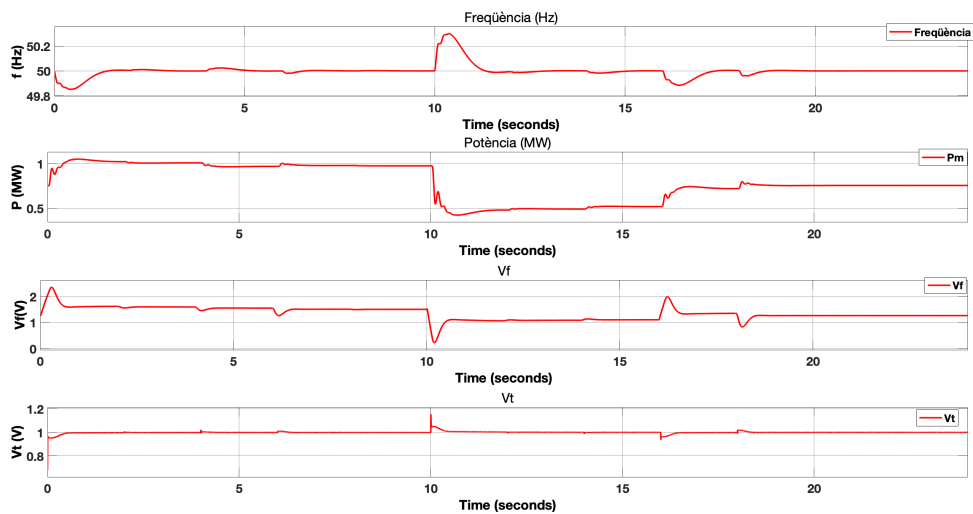


Figura 8.13: Variació del funcionament dels generadors dièsel segons la potència demandada per el sistema.

Es pot observar com la freqüència del sistema no es desestabilitza en excés (mínim de 49.8 Hz i un màxim de 50.25 Hz) quan hi ha canvis grans de demanda o producció com es veu en $t = 10$ s de la simulació. Aquest fet permet que el sistema sigui bastant estable ja que només es produeix una variació de $\pm 0.5\%$ i quan es produeixen pertorbacions importants el sistema té la capacitat d'estabilitzar-se en menys de 1 segon. La gràfica de la potència reflecteix a la perfecció l'adaptació dels dos generadors a la potència que és necessària que generin tot i que la seva

potència nominal és de 1 MW.

Finalment el balanç de potència total de la microxarxa es defineix per l'equació:

$$P_{Total} = P_{Generador1} + P_{Generador2} + P_{ESS} + P_{Demanda} + P_{PV} + P_{losses} \quad (39)$$

Els diferents components de l'equació tindràn valor positiu si generen potència i negatiu si la consumeixen.

La Figura 8.14 representa la potència activa generada o consumida per cada un dels components que treballen en la microxarxa. Les pèrdues no es representen a la gràfica, però si que es sap que existeixen ja que si en un instant determinat es substitueixen els valors de les diferents potències el valor de potència perduda és diferent a zero.

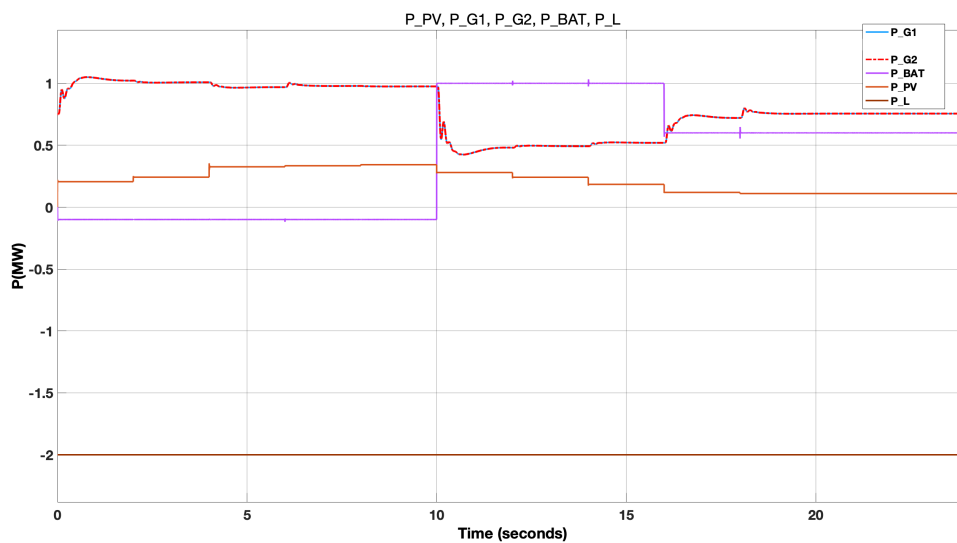


Figura 8.14: Evolució de la potència activa durant la simulació de la microxarxa.

De la figura anterior remarcar que com els dos generadors tenen la mateixa potència, es solapen les respectives gràfiques de potència generada.

Finalment a la Figura 8.15 es veu l'evolució del voltatge de la xarxa durant tota la simulació.

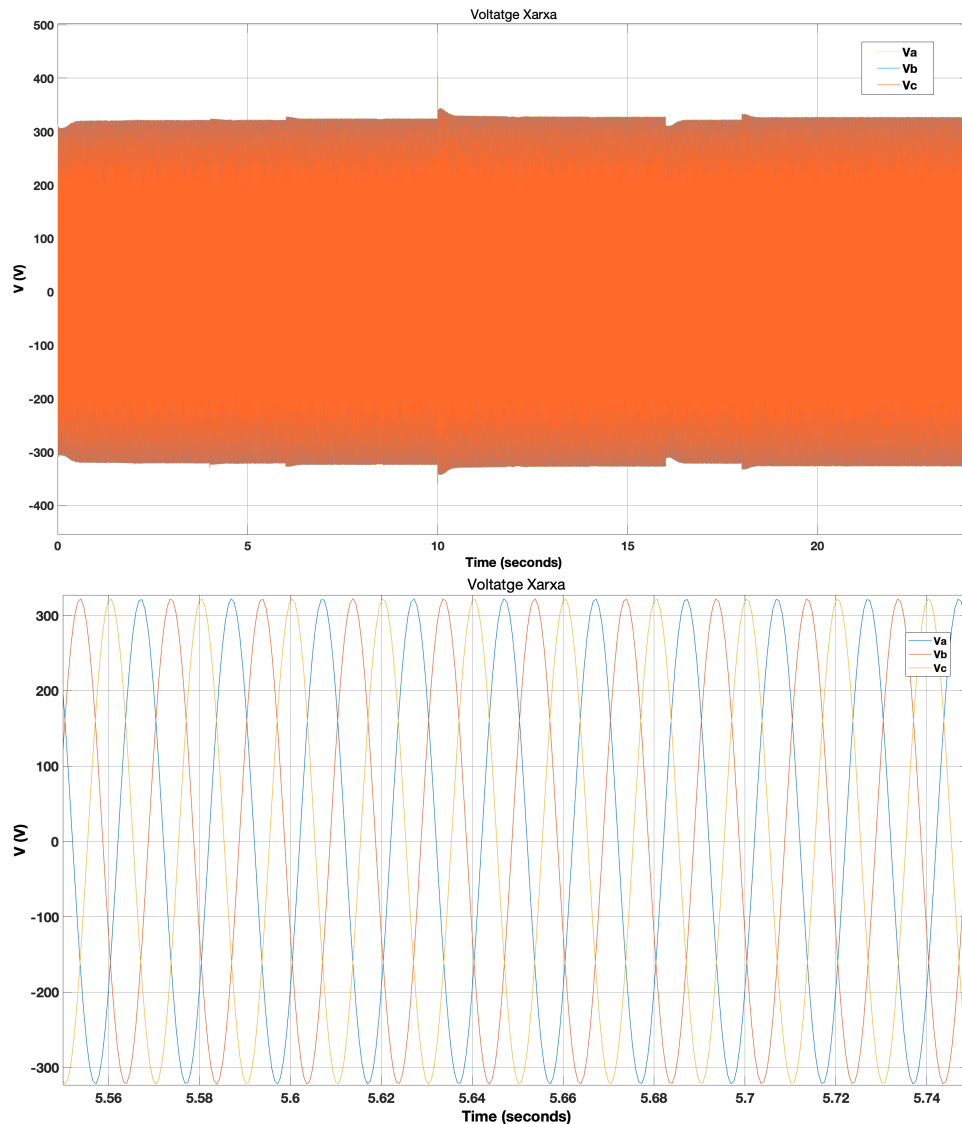


Figura 8.15: Evolució voltatge xarxa durant la simulació

Es pot observar com degut a les diferents perturbacions que sofreix el sistema, el voltatge es manté constant durant tota la simulació el que implica que els consumidors de la xarxa no notin grans variacions en l'electricitat que reben.

8.2.2 Estudi funcionament microxarxa amb demanda variable

Per aquesta simulació a part de la demanda constant (la qual s'ha reduït a 500 kW) es té una demanda variable com es pot observar a la Figura 8.16 . Aquesta demanda variable s'ha modelat intentant imitar les demandes de potència per un dia qualsevol. A continuació es presenten les gràfiques més importants de cara a l'extracció de conclusions sobre la simulació i el sistema.

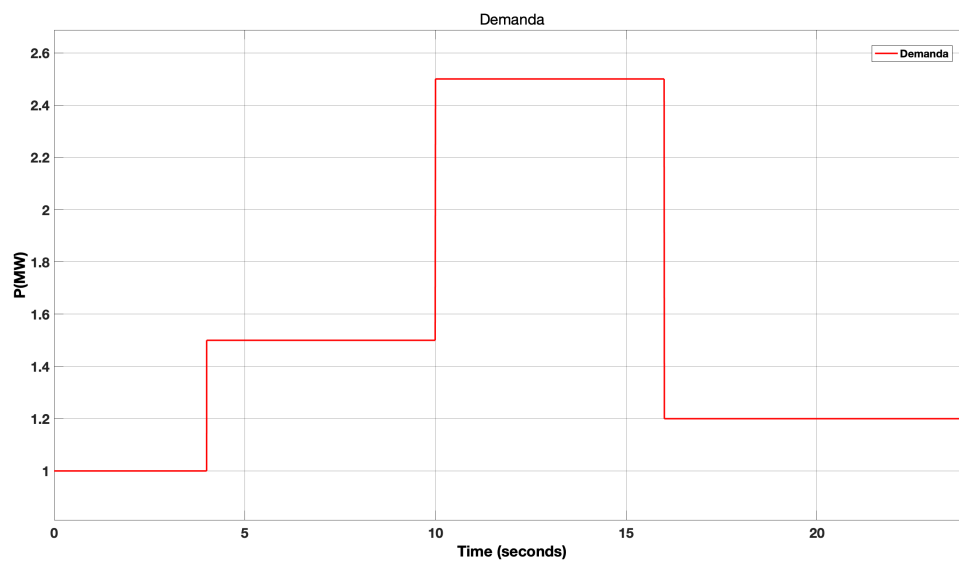


Figura 8.16: Perfil de demanda de la microxarxa

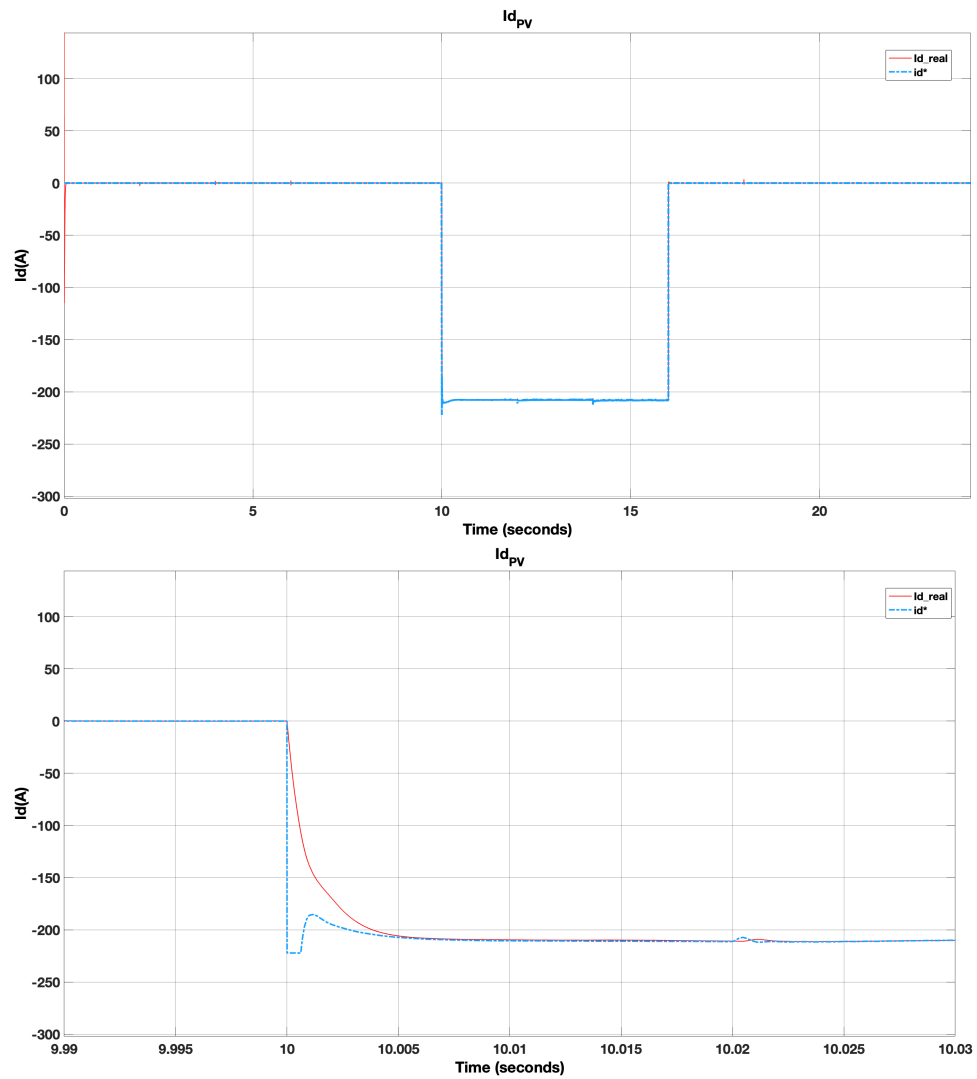


Figura 8.17: Valors de referència i reals de la i_d generada per les plaques fotovoltaïques.

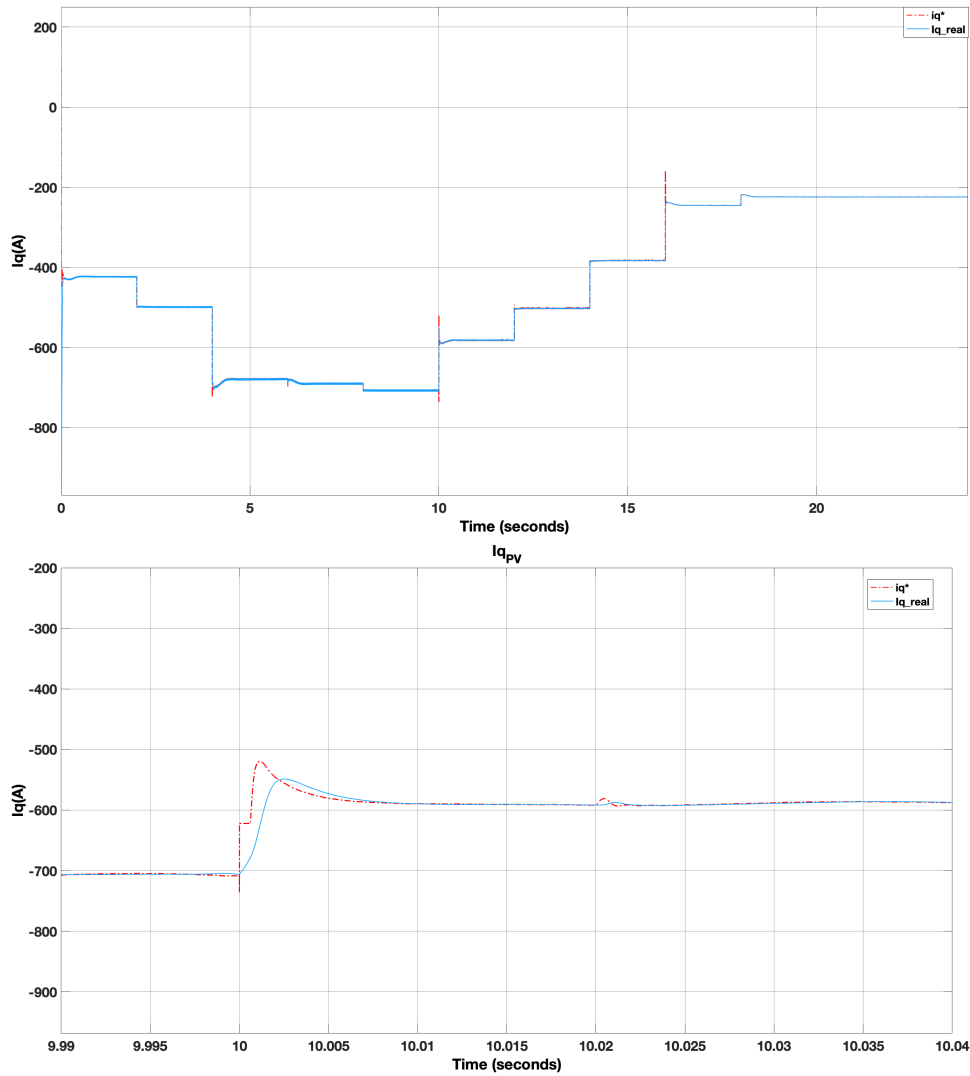


Figura 8.18: Valors de referència i reals de la i_q generada per les plaques fotovoltaïques.

De les Figures 8.17 i 8.18 es pot extreure el bon funcionament del VSC tot i els canvis sobtats de demanda del sistema. Es pot observar que les corrents mesurades s'estabilitzen amb menys de $t = 4\tau_{\text{control-loop } S}$.

Les gràfiques referents a les intensitats presents a la Figura 8.19, demostren també el bon funcionament de les bateries i el seu respectiu VSC per aquesta simulació.

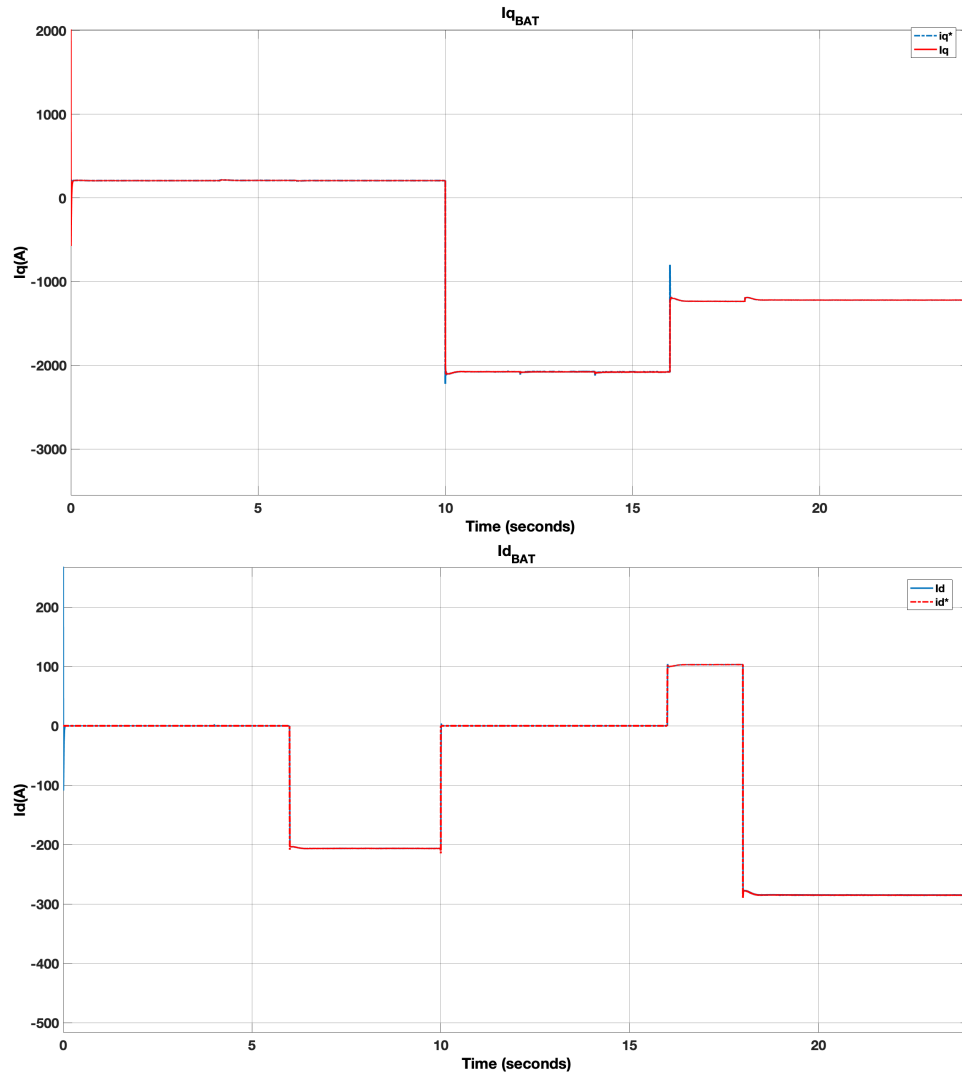


Figura 8.19: Valors de referència i reals de la i_q i i_d generada i consumida per les bateries.

En la Figura 8.20 es presenta el funcionament de ambdós generadors dièsel i com el seu controlador permet una ràpida estabilitat davant els canvis de sobtats de demanda.

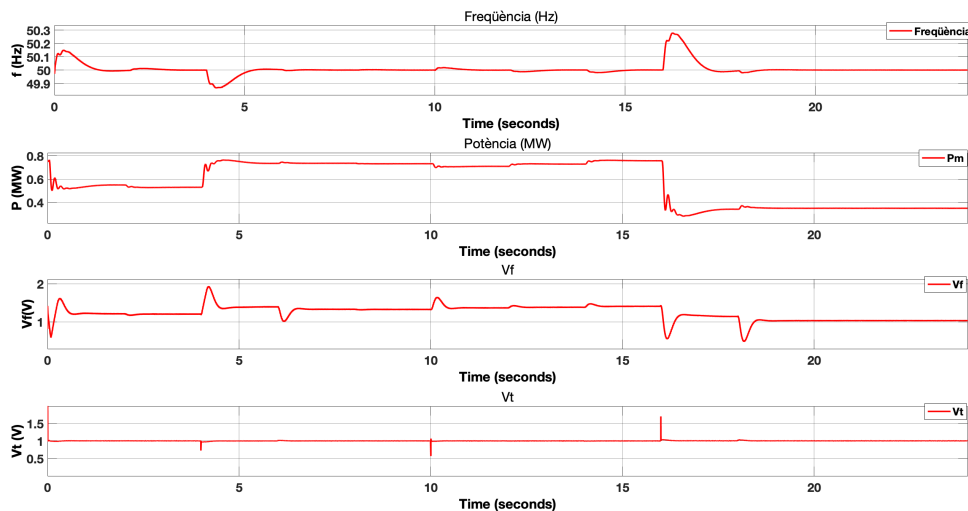


Figura 8.20: Variació del funcionament dels generadors dièsel segons les demandes de la xarxa.

Es pot observar que tot i els canvis la freqüència segueix en uns intervals de variació molt petits (una altra vegada aproximadament del 0.5%) el que permet assegurar el bon funcionament del sistema.

Finalment seguint les equacions de balanços de potència abans presentats, el sistema varia segons la Figura 8.21.

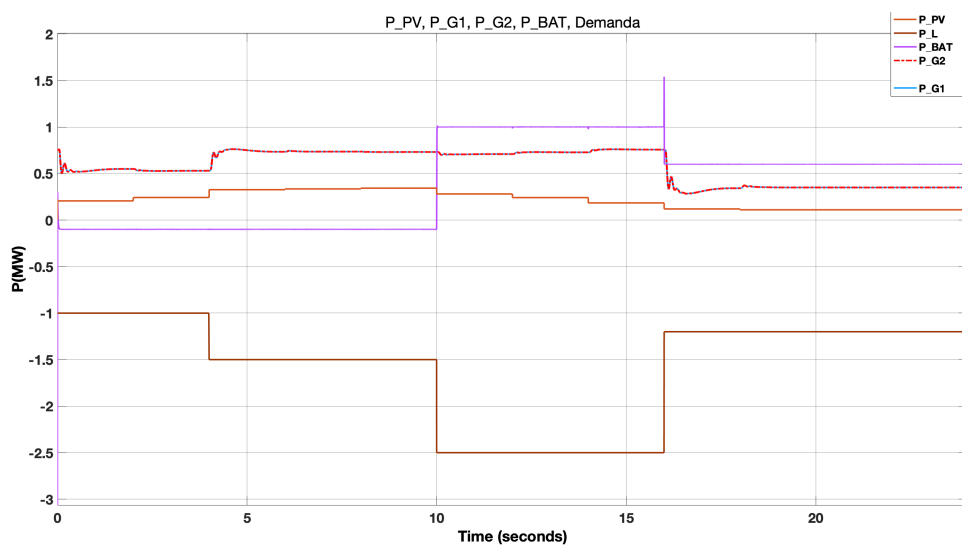


Figura 8.21: Balanç potència generada i consumida en la Simulació 2.

En aquesta simulació es pot veure que els generadors treballen menys en certes ocasions que en la simulació anterior, on es tenia una demanda constant elevada. Aquest fet permet que en ocasions de baixa demanda els generadors no s'utilitzin en excés millorant així el ratio d'ús de les energies renovables. Per acabar a la Figura 8.22 es pot tornar a veure com el voltatge de la xarxa es manté constant tot i els forts canvis de demanda i generació que es produeixen el que permet assegurar un bon control i funcionament del sistema.

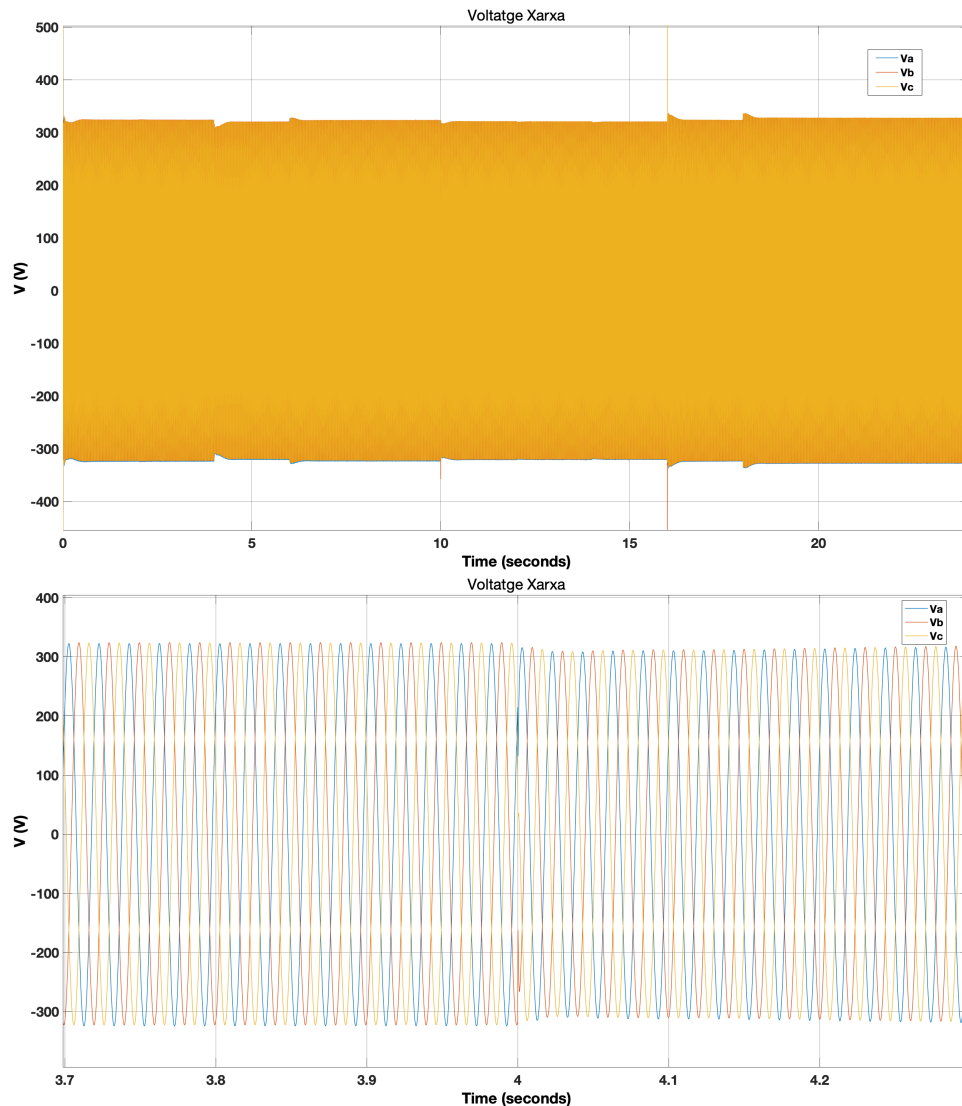


Figura 8.22: Voltatge de la xarxa per la simulació amb demanda variable.

Es pot observar que a $t = 4$ s hi ha una petita baixada de la tensió causada per els canvis en el subministrament de la xarxa.

8.2.3 Estudi funcionament microxarxa amb desconnexió

Aquesta simulació es realitza amb la desconnexió de un dels generadors a $t = 8$ s, simulant una averia o parada per manteniment d'un dels generadors dièsel. Aquest tipus d'estudi es podria realitzar amb qualsevol dels generadors existents, siguin renovables o no, però al ser els generadors dièsel els que generen més energia la caiguda d'un d'ells provocarà un afecte més notable a l'estabilitat del sistema. A més, les plaques fotovoltaïques al estar formades per molts mòduls és més difícil que es produeixi una parada general d'aquestes. Si més no es podria produir una baixada parcial de la potència que generen però difícilment una parada total.

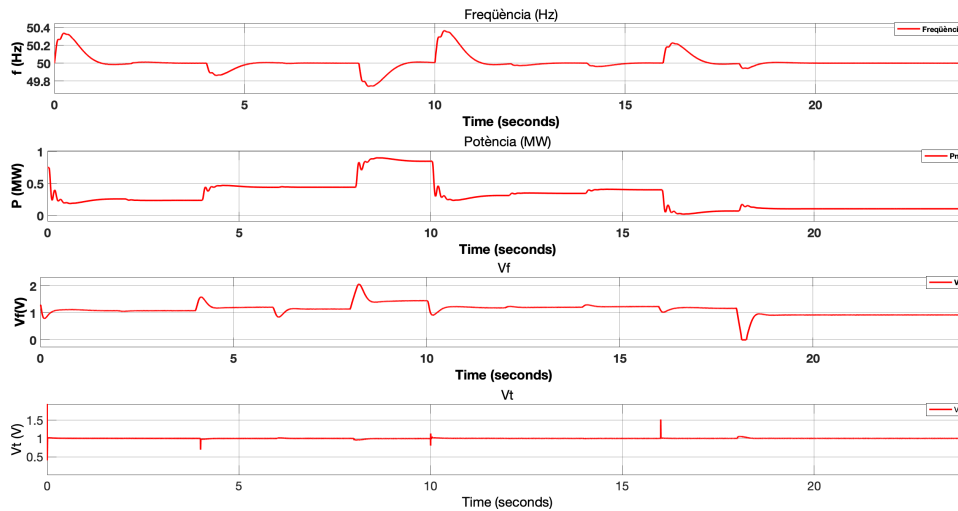


Figura 8.23: Funcionament generador dièsel sota variació de demanda i parada de generador.

Per aquest estudi la demanda variable s'ha reduït com es pot observar a la Figura 8.24.

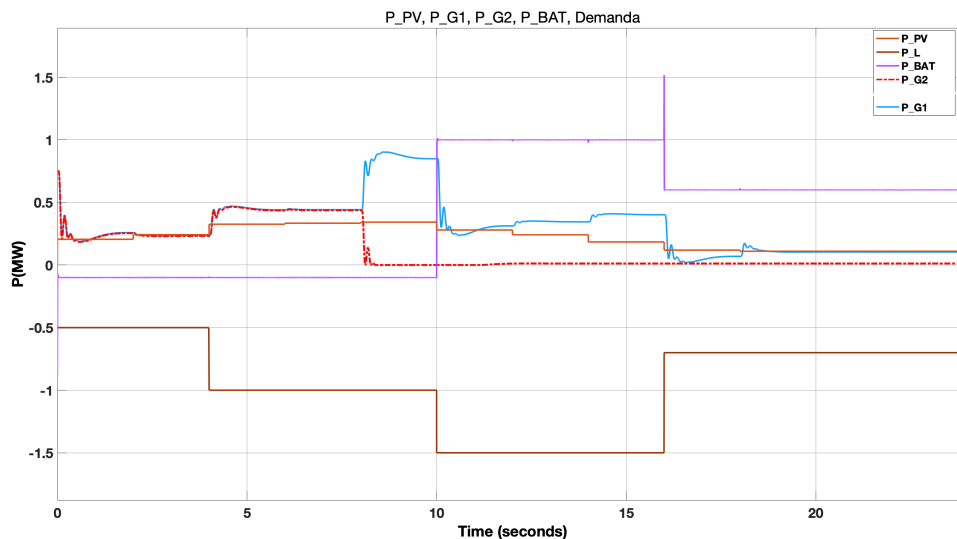


Figura 8.24: Balanç de potències

Es pot observar com una vegada es para un dels generadors ($t = 8$ s), l'altre pren el control de la potència demandada. Tot i haver d'absorbir tota la potència només un generador dièsel el sistema es manté estable durant tota la simulació. En la Figura 8.23 es pot veure que la freqüència es desestabilitza més que en els estudis anteriors. Aquest fenomen es pot entendre com a normal ja que es produeix un canvi molt brusc de potència generada degut a la parada del segon generador dièsel.

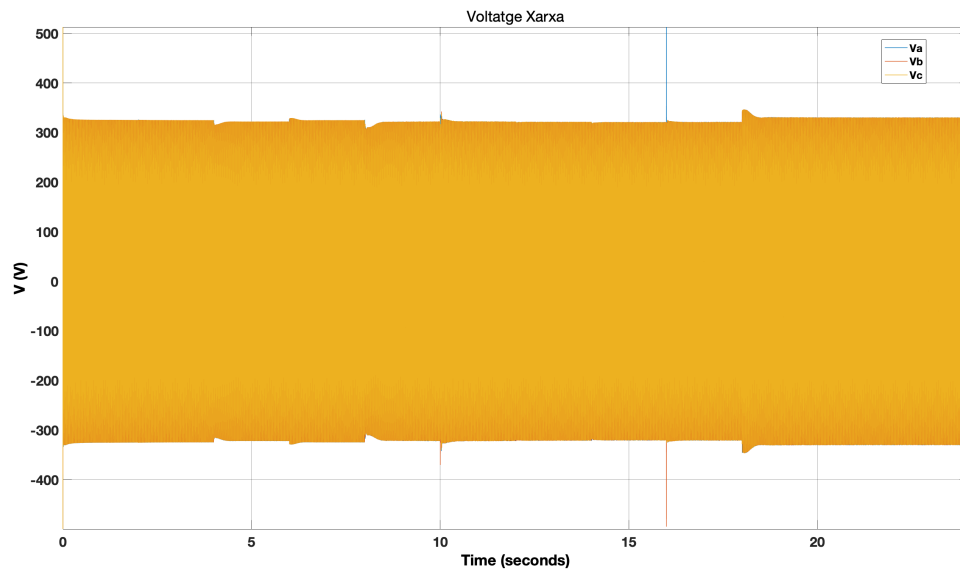


Figura 8.25: Voltatge de la xarxa per la simulació amb desconexió de generador.

La Figura 8.25 demostra la bona estabilitat del sistema tot i la caiguda d'un dels generadors principals.

9 Conclusions

El projecte ha estudiat el disseny, operació, control i simulació d'una microxarxa, totalment aïllada de la xarxa elèctrica, formada principalment per generadors dièsel, plaques fotovoltaïques i el convertidor VSC. La resta d'elements, com les bateries i les càrregues, s'han simplificat i implementat de la manera més senzilla possible.

La modelització del circuit equivalent del generador dièsel per simular el seu funcionament ha donat uns resultats molt bons en tots els casos estudiats. S'ha demostrat doncs la capacitat d'aquests per adaptar-se als canvis bruscos de potència demandada assegurant l'estabilitat de la microxarxa fins i tot en els casos en que un dels generadors es desconnectava del sistema i que obligava al generador romanent a treballar al màxim de les seves prestacions juntament amb les plaques fotovoltaïques i el sistema de bateries. S'ha modelat el conjunt de plaques solars, obligant a aquestes a treballar sempre al punt de màxima potència mitjançant el MPPT, amb resultats plenament satisfactoris.

Tot i la dificultat que presentava el disseny del VSC, degut al nombre de factors que s'havien de considerar per fer-lo compatible amb cada un dels elements amb els que treballava, s'ha aconseguit que aquest sigui capaç de fer la transformació AC/DC i viceversa. És més, s'ha aconseguit que davant les inestabilitats del sistema, els valors de corrent i potència s'estabilitzin dins el marge de temps requerit, amb l'objectiu de mantenir el sistema estable.

Tot i el bon funcionament que s'assolia de cada un dels elements principals per separat, no s'assegurava que al connectar-los tots entre ells per dissenyar la microxarxa aquesta condició fos suficient i necessària. Tot i així les simulacions realitzades han demostrat la capacitat del sistema de treballar en harmonia davant les condicions excepcionals a les quals s'ha sotmès la microxarxa. En totes s'ha pogut comprovar la poca variabilitat de l'interval de freqüència del sistema i l'estabilitat del voltatge que s'han mantingut sempre a 50 Hz i 400 V.

A més el sistema és el suficientment flexible per ser ampliat. S'ha demostrat que es pot modificar el tamany del camp de plaques solars o la demanda del sistema sense que això provoqui grans alteracions d'aquest. Aquest fet obre la porta a nous objectius i passos a seguir, que s'explicaran en el següent apartat.

9.1 Pròxims passos

En un futur es podria implementar un nou tipus de VSC que permetria a aquest treballar com a generador de xarxa. Per aquesta implementació seria necessari afegir el següent controlador als VSC existents,

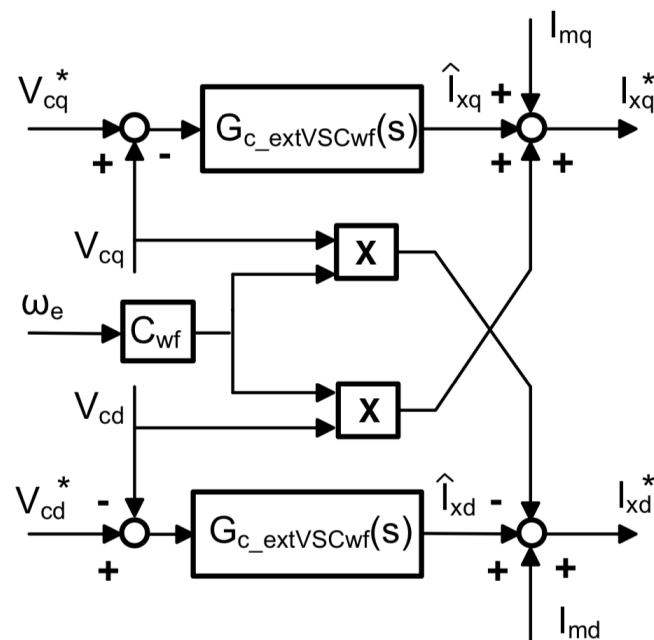


Figura 9.1: Esquema del llaç extern a implementar. [26]

Un altre pas a realitzar seria el de dissenyar un *Smart Energy Storage System* que segons les necessitat de la xarxa es carreguessin o es descarreguessin les bateries. També es podria fer un estudi de la localització a la qual implementar la microxarxa i simular aquesta amb dades reals d'irradiació i temperatura d'aquesta localització.

Finalment, amb la intenció de aconseguir un món més net, es podria implementar una substitució total dels generadors dièsel per fonts d'energia purament alternatives. En el cas de una illa, localització per la qual està pensat aquest treball, es podria fer ús d'energies maremotrius, eòliques, entre d'altres i així aconseguir la dependència mínima del dièsel, deixant aquest generadors com a generadors d'emergència.

Com es pot observar i com es va explicar en la definició de les microxarxes, les possibilitats de millora d'aquestes són molt elevades. Per tant la llista de pròxims passos per aquest projecte és molt llarga i versàtil segons les condicions a les quals es vol fer treballar la xarxa.

10 Pressupost

El pressuposts contendrà els recursos humans usats i també els recursos tangibles necessaris per la realització de l'estudi. En aquest apartat no es tindrà en compte el pressupost dels elements a implementar ni els costos derivats com transport a la localització, empleats, etc.

10.1 Cost de personal

Aquest apartat inclou totes les hores dedicades a la realització del projecte (investigació, disseny, simulació i redacció). En la Taula 10.1 es pot trobar un resum de les hores i costos dedicats al projecte.

Fase	Hores[h]	Preu [€/h]	Total[€]
Investigació	40	25	1000
Consultoria professorat	50	30	1500
Disseny	100	30	2500
Simulacions	70	30	2100
Redacció	60	20	1200
Total			8300 €

Taula 10.1: Cost humà

10.2 Cost de llicències

Per aquest projecte només s'ha fet ús del software Matlab R2018b [29], amb les llibreries Simscape i la plataforma per edició de articles i treballs Overleaf [30]. Els costos associats a aquests es pot trobar a la Taula 10.2

Software	Preu llicència
Matlab R2018b Industry version	800 €
Overleaf	84 €
Total	884 €

Taula 10.2: Cost llicències

10.3 Cost de material

Degut a que aquest projecte no es basa en la implantació de la microxarxa, els únics costos materials que es tenen són els de la Taula 10.3.

Equipament	Preu
Macbook Pro Retina	1600 €
Targus AMU650 Mouse	16 €
Total	1616 €

Taula 10.3: Cost equimanet

10.4 Cost total associat

El cost total d'aquest projecte serà la suma dels costos associats de tots els presentats anteriorment. Aquest projecte és aproximat ja que en la realitat s'haurien de tenir en compte moltes més variables de les que s'han tingut en compte. Tot i així a mode orientatiu es pot donar per vàlid el cost del projecte.

Costos	Preu
Humans	8300 €
Llicències	884 €
Materials	1616 €
Total	10800 €
Total (21% iva)	13068 €

Taula 10.4: Cost total projecte

11 Impacte ambiental

Avui en dia a l'hora de dissenyar o millorar sistemes o serveis de qualsevol tipus és molt important realitzar un estudi de l'impacte ambiental que pot tenir la implementació d'un projecte. És important doncs, adaptar-se a les normatives vigents a cada un dels països on es vulgui implementar. Per tant s'ha de tenir en compte, que moltes vegades el mateix projecte pot sofrir variacions importants segons el lloc d'implementació arribant a ser impossible d'implementar degut a les normatives.

Per aquest projecte, al tractar-se d'un estudi de l'operativitat i control de la microxarxa, només es realitzarà un estudi que demostrarà el benefici de utilitzar un sistema híbrid en front d'un sistema purament governat per generadors d'energies fòssils.

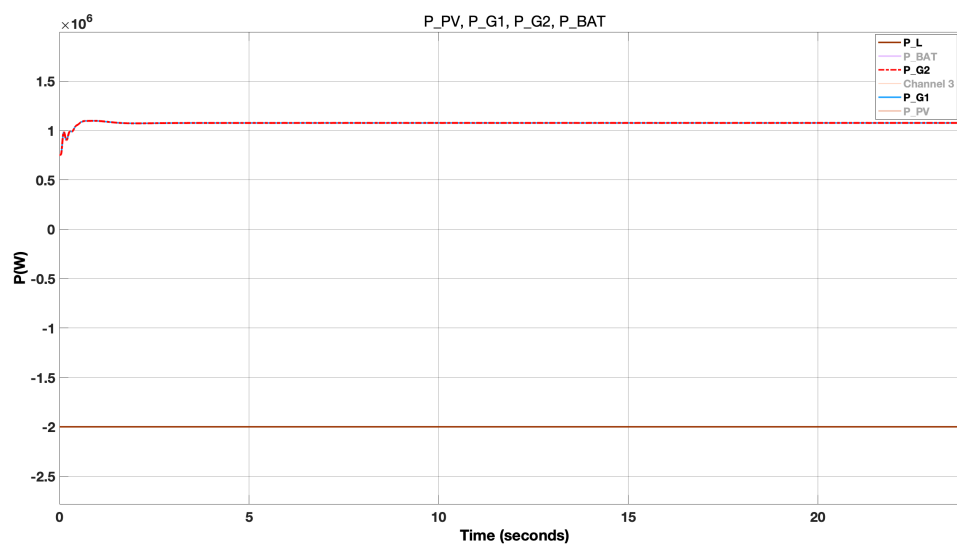


Figura 11.1: Estudi només amb generadors dièsel

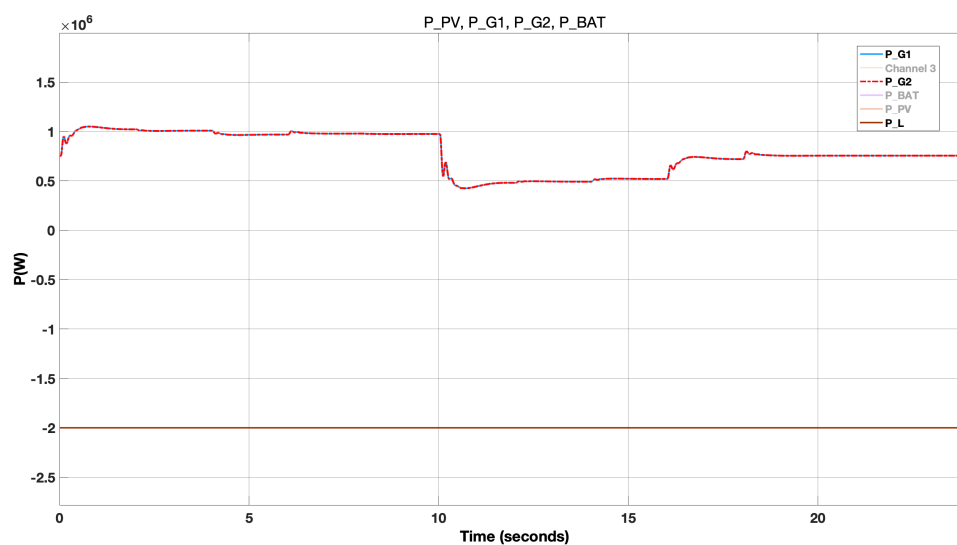


Figura 11.2: Estudi dièsel+renovables+bateries

Com es pot observar en les Figures 11.2 i 11.1 quan es té un sistema híbrid la potència generada per les dièsel és molt menor.

Tipus microxarxa	Potència aportada DG
Energies fòssils	2.14 MW
Híbrida	1.57 MW

Taula 11.1: Comparativa ús dièsel

L'ús de una microxarxa híbrida implica una disminució del 36% de la potència generada per els dièsel. Aquesta disminució es prou important perquè en el cas que es generin 1000 tones de emissions contaminants durant tot un any de funcionament dels generadors d'aquest estudi, al haver implementat una xarxa híbrida es reduiria en 360 tones de emissions.

Amb aquesta nova simulació realitzada queda clara la importància de les microxarxes avui en dia ja que no només es redueix en emissions si no també en costos d'obtenció del dièsel. El que permetria que la inversió inicial feta per implementar sistemes d'energies renovables es rentabilitzi en un període realtivament curt.

Finalment no s'ha d'olvidar que la manufacturació de plaques fotovoltàiques i bateries no estan exemptes de contaminació. El procés d'obtenció de materials, fabricació i transport consmu-eixen molta energia i no precisament de energies renovables [31]. Totes aquestes emissions es coneixen com emissions indirectes i la majoria d'empreses creen l'informe *Environmental Product Declaration (EPD)* que considera les emissions indirectes produïdes pel producte a través del seu cicle de vida. Aquest cicle de vida (*Life-cycle analysis(LCA)*) està regulat per la normativa ISO 14040 [32].

Agraïments

Volia agraïr de manera especial al meu tutor Eduardo Prieto Araujo per l'ajuda que m'ha ofert durant el temps de realització d'aquest projecte. Tot i no poder disposar de molt de temps per reunir-se amb mi ha fet possible que avancés en la realització del projecte mitjançant reunions per Skype i multitud de correus.

També voldria agraïr al departament CITCEA per proposar treballs de fi de grau com aquest, ja que és molt important avui en dia enfocar tot els esforços en nous models d'energies per evitar una efecte irreversible al canvi climàtic.

Finalment agraïr a tots aquells que en un futur puguin utilitzar aquesta petita aportació com a referència per seguir desenvolupant xarxes elèctriques millors i més sostenibles, ja que aquesta no és altre que la motivació personal de l'autor a l'hora de realitzar aquest projecte.

A Annexos

A.1 Transformada de Park

Per entendre el funcionament de les diferents parts del sistema que s' exposaran a continuació és necessari parlar de la transformació de Park que es basa en la projecció dels valors de tensió i corrent referenciats en eixos alpha, beta gamma, i transformar-los a uns eixos dinàmics que corresponen a l'angle de fase de les tensions i corrents de la xarxa elèctrica definida com:

$$[X_{qd0}] = [T_{qd0}][X_{abc}] \quad (40)$$

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (41)$$

La transformada de Park també es pot veure com una transformació geomètrica que combina la transformació de Clarke amb una rotació de la referència:

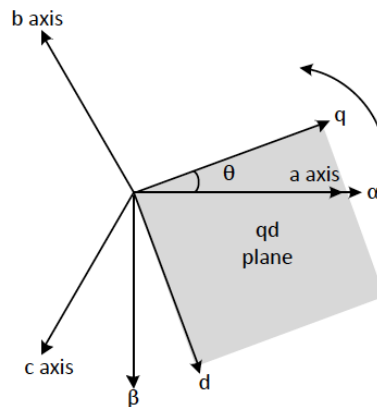


Figura A.1: Representació geomètrica de la transformada de park. [5]

A.2 Simulacions excitadors generador dièsel

Simulacions fetes amb els diferents excitadors disponibles per el generador dièsel. Es pot veure com alguns dels excitadors com el AC1A o el ST1A estableixen el motor en menys de 2 segons.

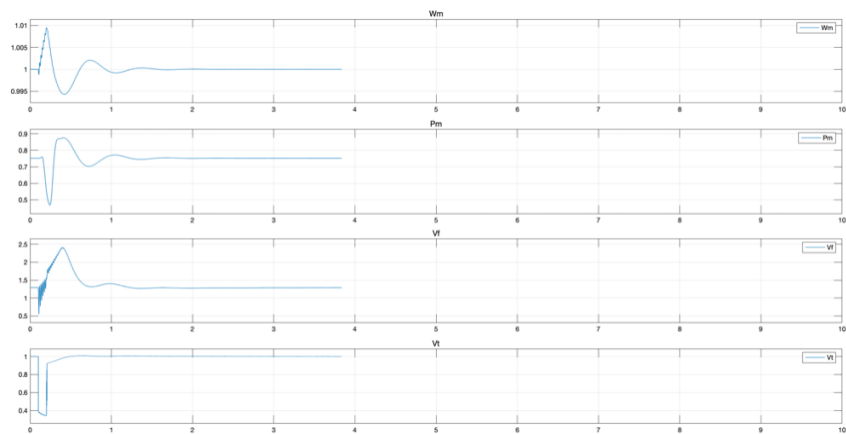


Figura A.2: AC1A

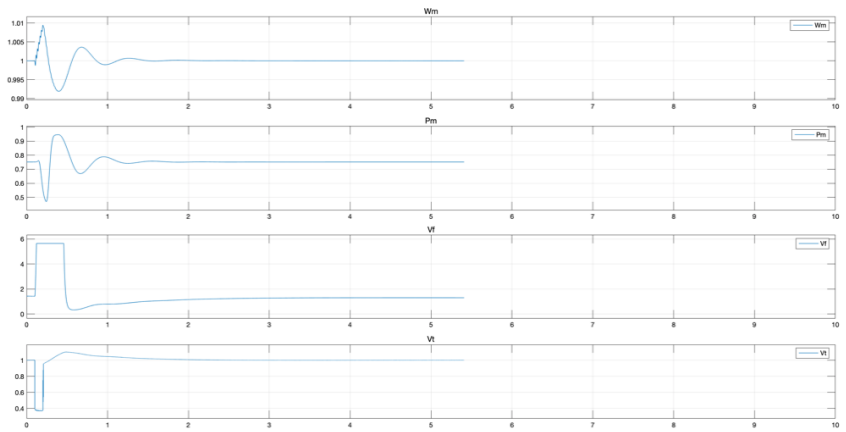


Figura A.3: AC4A

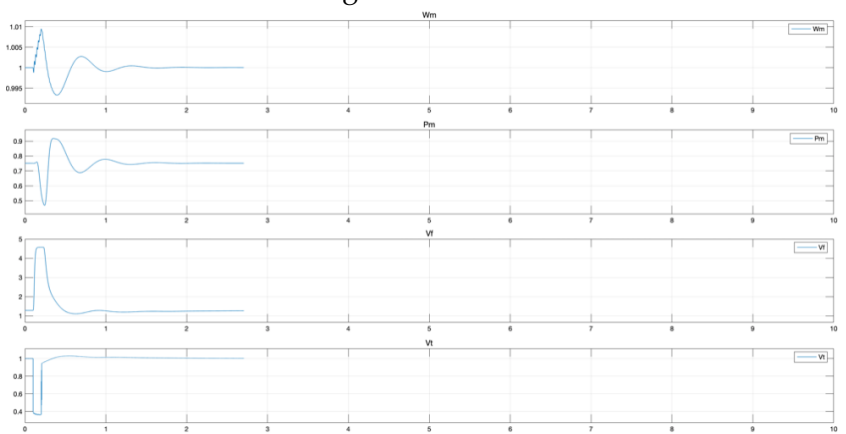


Figura A.4: AC5A

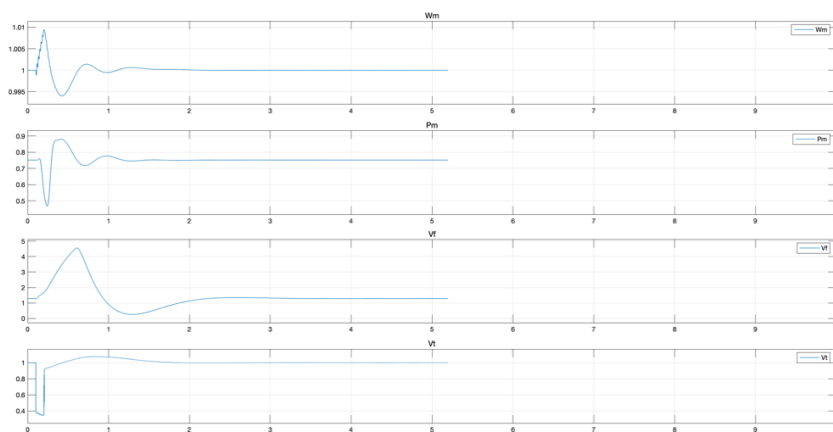


Figura A.5: DC1A

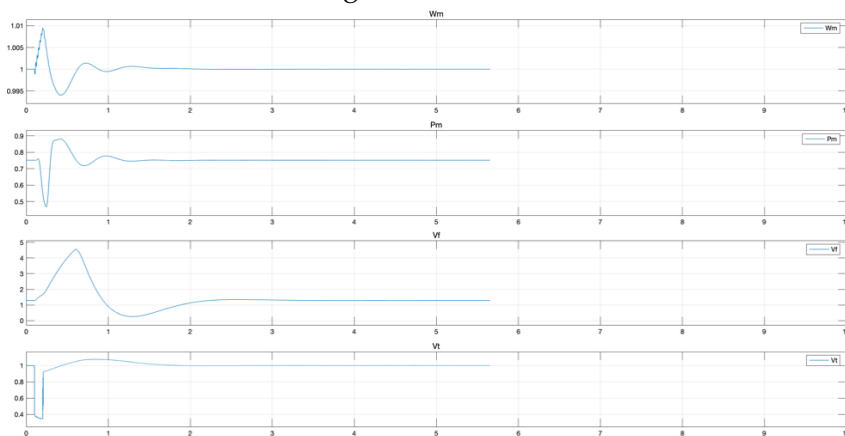


Figura A.6: DC2A

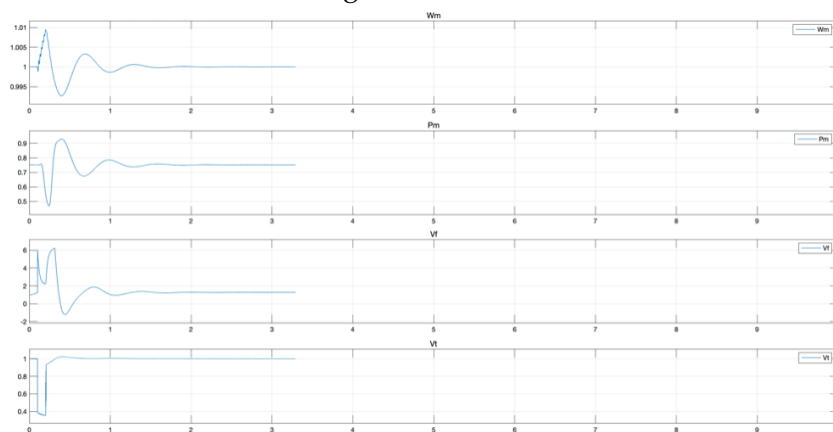


Figura A.7: ST1A

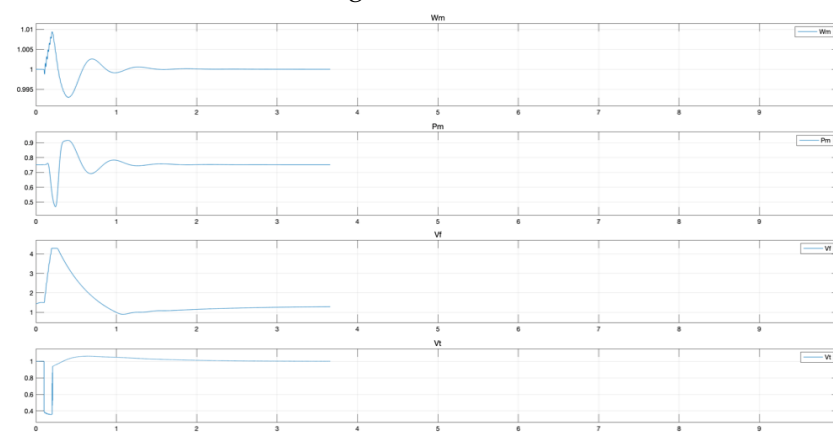


Figura A.8: ST2A

A.3 Model Matlab plaques solars

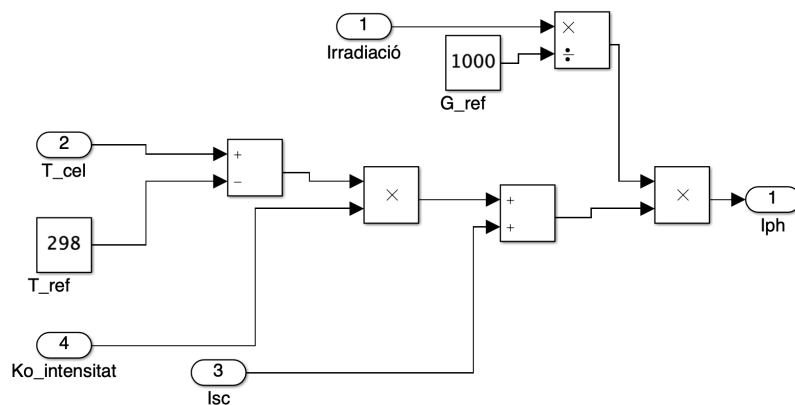


Figura A.9: Generació corrent fotovoltaic. Equació 6

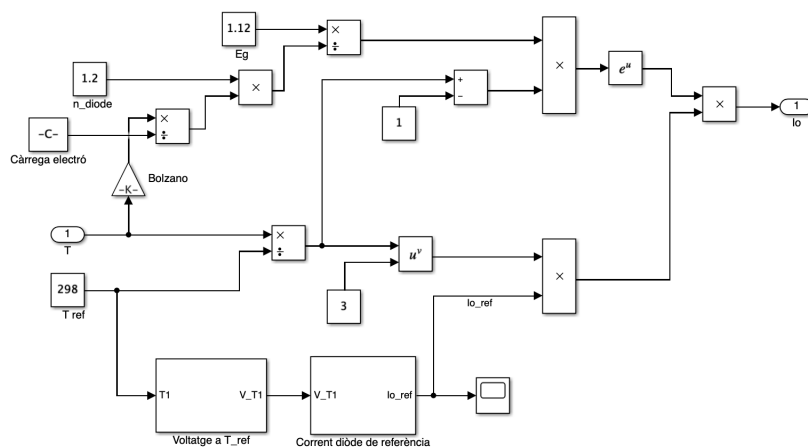


Figura A.10: Generació corrent diòde. Equació 9

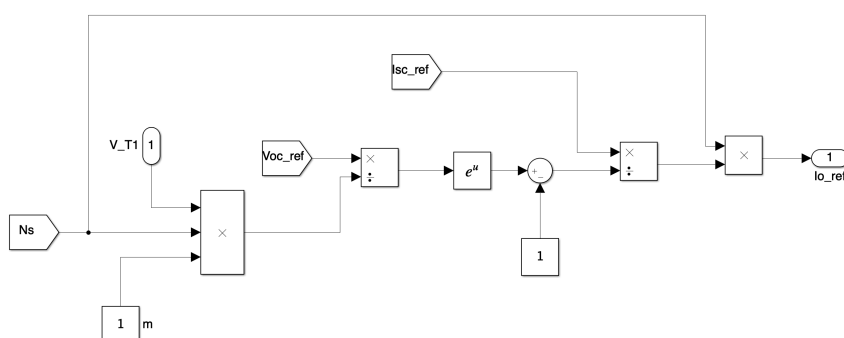


Figura A.11: Corrent diòde a temperatura de 25°C. Equació 10

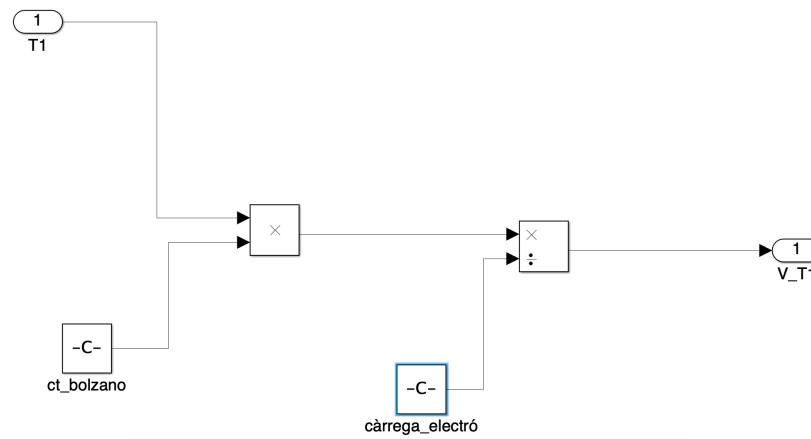


Figura A.12: Voltatge a 25°C pel càlcul de $V_{oc}(T_1)$. Equació 9

Bibliografia

- [1] RESILIENT ELECTRICITY NETWORKS FOR A PRODUCTIVE GRID ARCHITECTURE (RENGA), www.imperial.ac.uk/energy-futures-lab/research/energy-infrastructure/renga 2019
- [2] LARGE-SCALE ISLAND ELECTRIFICATION, ST. EUSTATIUS, www.sma.de/es/productos/referencias/san-eustaquio-caribe.html 2019
- [3] H. IBRAHIM, A. BOURJI, M. GHANDOUR, A. MERABE, *Optimization of Compressed Air Storage's Volume for a Stand-Alone Wind-Diesel Hybrid System* 2019
- [4] ANDREW SIMPSON, *Manual del motor diésel : enseñanzas y consejos de especialistas* 2019
- [5] AGUSTÍ EGEA-ALVAREZ, ADRIÀ JUNYENT-FERRÉ AND ORIOL GOMIS-BELLMUNT, *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems* 2019
- [6] DIESEL SERVICE AND SUPPLY <https://www.dieselserviceandsupply.com/> 2019
- [7] DIESEL GENERATOR <https://dieselgeneratordirect.uk>
- [8] SYNCHRONOUS VS ASYNCHRONOUS GENERATORS <https://www.kiwithinker.com/2017/05/generator-types-synchronous-versus-asynchronous-what-goes-on-inside-the-machines/>
- [9] ANPIER, <http://anpier.org> 2019
- [10] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, <https://www.iea.org> 2019
- [11] CENSOLAR, <https://www.censolar.org> 2019
- [12] METEONORM, <https://meteonorm.com> 2019
- [13] SOLAR CELL STRUCTURE <http://www.renewable-energy-concepts.com/solarenergy/solar-technology/si-solar-cell-structure-function.html>
- [14] WHOLESALESOLAR, <https://www.wholesalesolar.com/solar-information/start-here/gridtie-information> 2019
- [15] HOW DOES STORAGE WORK IN PV SYSTEMS? - SUSTAINABLE ENERGY - TU DELFT, *Video* 2019
- [16] HOW DOES AN INVERTER AND MPPT OF A PV SYSTEM WORK? - SUSTAINABLE ENERGY - TU DELFT, *Video* 2019
- [17] GREEN ENERY CORPORATION, <http://www.greenenergycorp.com> 2019
- [18] A. ILINCA, D. ROUSSE, A. CHANDRA, D. RAMDENE, *Dynamic Modeling of Diesel Generator Based on Electrical and Mechanical Aspects* 2019
- [19] GEOFF WALKER, *Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model* 2019
- [20] J. A. GOW, C. D. MANNING, *Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies,* 2019

- [21] DNV GL, *2018 PV module reliability scoreboard 2019*
- [22] HOW TO CHOOSE A HIGH QUALITY SOLAR PANEL, <https://www.cleanenergyreviews.info> 2019
- [23] SUNPOWER X-SERIES, <https://www.sfe-solar.com> 2019
- [24] SAMER SAID, AHMED MASSOUD, MOHIEDDINE BENAMMAR AND SHEHAB AHMED, *A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox* 2019
- [25] HADJER BOUNECHBA, AISSA BOUZID, HAMZA SNANI, ABDERRAZAK LASHAB, *Real time simulation of MPPT algorithms for PV energy system* 2019
- [26] ORIOL GOMIS, *Anàlisi i control de tipologies de convertidors per a parcs eòlics marins connectats en HVDC* 2019
- [27] SMA ENERGY <https://www.sma.de/es.html>
- [28] NASA SOLAR RADIATION <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [29] MATLAB <https://www.mathworks.com>
- [30] OVERLEAF <https://www.overleaf.com>
- [31] IMPACTE PV https://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/
- [32] NORMATIVA ISO 14040 <https://www.iso.org/obp/>
- [33] EMERGENCY DIESEL GENERATOR, <https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/emergency-diesel-generator-and-asynchronous-motor.html> 2019
- [34] ALEKSANDR GAVRILOVICH KUZNETSOV, *A mathematical model of a diesel engine for simulation modelling of the control system* 2019
- [35] T. THEUBOU, R. WAMKEUE, SENIOR MEMBER, *Dynamic Model of Diesel Generator set for Hybrid Wind-Diesel small grids applications* 2019
- [36] THREE-PHASE PI SECTION LINE, <https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasepisectionline.html> 2019